

Braunschweig, 05.12.1979  
Kpf/Schr

### Kurzfassung des Abschlußberichtes.

**Forschungsthema:** Untersuchungen über die Gefahr vorzeitigen Versagens infolge Schubbruches von Stahlbetonkonstruktionen unter Brandbeanspruchung, Teil I, II und III

**Forschende Stelle:** Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Beethovenstr. 52, 3300 Braunschweig

**Datum der Vergabe:** 24.10.1973, 16.07.1976, 21.03.1977

### 1. Ziel der Untersuchung.

Die Neufassung der DIN 1045 (Ausgabe 1972) bringt für die Bemessung auf Querkraft einige wesentliche Änderungen gegenüber der alten Norm.

Die Höchstzulässigen Rechenwerte der Schubspannung  $\tau_0$  unter Gebrauchslast sind bei Balken höherer Betonfestigkeitsklassen erheblich heraufgesetzt.

In gewissen Grenzen des Rechenwertes der Schubspannung wird nur eine verminderte Schubdeckung gefordert, die durch bessere Anpassung an den wirklichen Kräfteverlauf vorher nicht ausgenutzte Reserven nunmehr in Anspruch nimmt.

Der Rechenwert der Querkraft darf - abhängig von der Lagerungsart - gegenüber der rechnerischen Auflagerkraft abgemindert werden bis zu dem Wert, der im Abstand 0,5 h vom Auflagerrand auftritt.

Die neue Regelung führt in vielen Fällen zu erhöhter Beanspruchung des Betons im Bereich der "Druckstreben". Hinzu kommt, daß die Biegedruckzone nun höher als bisher ausgenutzt werden darf, so daß bei Biegegliedern im Bereich negativer Momente zwei für das Brandverhalten ungünstige Faktoren zusammentreffen können.

Gegenüber den früheren baupraktischen Gepflogenheiten wird jetzt häufig auf aufgebogene Stäbe der Biegezugbewehrung bei der Schubkraftdeckung völlig verzichtet. Die "Zugstreben" der erweiterten Fachwerkanalogie nach Rüschi/Kupfer werden vielmehr allein durch die Bügel gebildet, die i. a. an den Querschnittsrändern liegen und im Brandfall schnell auf Temperaturen, bei denen deutliches Absinken der Stahlfestigkeit auftritt, erwärmt werden.

Es war zu prüfen, ob Stahlbetonbalken, entworfen nach den Mindestforderungen der DIN 1045 (Ausgabe 1972) und der DIN 4102 Teil 4 (E 1978), im Brandfall ausreichende Sicherheit gegen Schubversagen aufweisen.

Dabei war einem Sonderfall besondere Aufmerksamkeit zu widmen: der Aufnahme vergrößerter Querkräfte, die durch Schnittkraftumlagerungen bei Durchlaufkonstruktionen unter Brandeinwirkung entstehen.

## 2. Ergebnis der Untersuchung.

### 2.1 Einflüsse auf das Schubverhalten unter Brandbeanspruchung

Es wurde eine Reihe von Stahlbetonbalken in Normbrandversuchen gemäß DIN 4102 auf Schubverhalten geprüft. Alle diese Balken waren nach DIN 1045, Ausgabe 1972, konstruiert, wobei jeweils deren Mindestforderungen eingehalten wurden. Die Schubbewehrung bestand in aller Regel ausschließlich aus vertikalen Umschließungsbügeln.

Dem praktischen Zweck des Forschungsvorhabens entsprechend - Abstimmung der DIN 4102 Teil 4 mit DIN 1045 - konnten nur die vermutlich wichtigsten Einflüsse untersucht werden. So wurde ein Versuchsprogramm festgelegt, in dem die folgenden Parameter variiert wurden:

- Tragwerksystem; Einfeld- und Zweifeldbalken,
- Belastung; Einzellasten und gleichmäßig verteilte Last,
- Momenten-Schubverhältnis  $M/Q \cdot h$  bzw. Balkenschlankheit  $l/h$ ,
- Höhe des Rechenwerts der Schubspannung  $\tau_0$  und damit volle und verminderte Schubdeckung
- Betonfestigkeitsklasse,
- Betonquerschnitt; Übereinstimmung mit Mindestforderungen nach DIN 4102.

Wie erwartet, erwiesen sich die Zweifeldbalken als empfindlicher gegen Schubversagen als die statisch bestimmten Einfeldsysteme, bei denen fast ausnahmslos Biegezugbrüche erzeugt wurden. Lediglich ein Einfeld-I-Balken mit dünnem Steg versagte durch Schubbeanspruchung, wobei ein Steg-Betonbruch ausschlaggebend war.

Ein Einfluß der Belastungsart deutete sich nur bei langer Brandbeanspruchung an. Bei allen Balken, die für die Feuerwiderstandsklasse F 90 ausgelegt waren, konnten keine signifikanten Verhaltensunterschiede, hervorgerufen durch die Belastungsart, festgestellt werden. Bei der angestrebten Feuerwiderstandsklasse F 180 verhielten sich jedoch die Gleichlastbalken besser als die Einzellastbalken.

Auch aus Laststellung oder Balkenschlankheit konnte - bedingt durch die begrenzte Anzahl der Versuche - kein signifikanter Einfluß bei Feuerwiderstandsklassen bis F 90 beobachtet werden. Bei einem für F 180 konstruierten Balken, bei dem das Momenten-Schubverhältnis  $M/Q \cdot h = 1,5$  betrug, wurde dagegen eine deutlich längere Feuerwiderstandsdauer erreicht als bei vergleichbaren Balken mit größerem  $M/Q \cdot h$ .

Ein Einfluß des im Schubbereich 2 verminderten Schubdeckungsgrades war nicht festzustellen.

Die Betonfestigkeitsklasse wurde nur bei drei Versuchen variiert, dabei konnte kein deutlicher Einfluß bemerkt werden.

Für Stahlbeton-Rippendecken konnten aus den gewonnenen Informationen nur Analogieschlüsse gezogen werden, die nicht voll befriedigen.

Mit der Untersuchung des Einflusses der Schubzulagen, die nach dem neuen Abschnitt 18.8 der DIN 1045, Ausgabe Dezember 1978, zulässig sind, auf das Brandverhalten von Stahlbetonbalken ist inzwischen begonnen worden. Auch hier stellt das Land Nordrhein-Westfalen Mittel zur Verfügung.

Für eine Theoriebildung reichte das durchgeführte Forschungsprogramm nicht aus, da mit den vorhandenen Geldmitteln ein intensives Studium der Parameter nicht möglich war. Immerhin konnte mit den Untersuchungen aber gezeigt werden, daß die Analogien der Lastabtragung, die für Tragwerke unter Raumtemperatur entwickelt worden sind - Zugbandbogen, Sprengwerk und Fachwerk -, auch für den Brandfall sinnvoll sind. Allerdings werden die Bügelspannungen, die nach der der Bemessung zugrunde liegenden erweiterten Fachwerkanalogie zu erwarten sind, bis zum Balkenbruch nicht erreicht.

## 2.2 Empfehlungen für die Neufassung DIN 4102 Teil 4

Aus praktischen Gründen wird hier eine Unterteilung entsprechend der für DIN 4102 Teil 4 vorgesehenen Art durchgeführt. Da sich die Durchlaufsysteme als die für Schubversagen anfälligeren erwiesen haben, wird die Darstellung der Empfehlungen für die statisch unbestimmt gelagerten Balken vorgenommen und die Bemessung der statisch bestimmt gelagerten Systeme - immer eine Vergünstigung - davon abgeleitet.

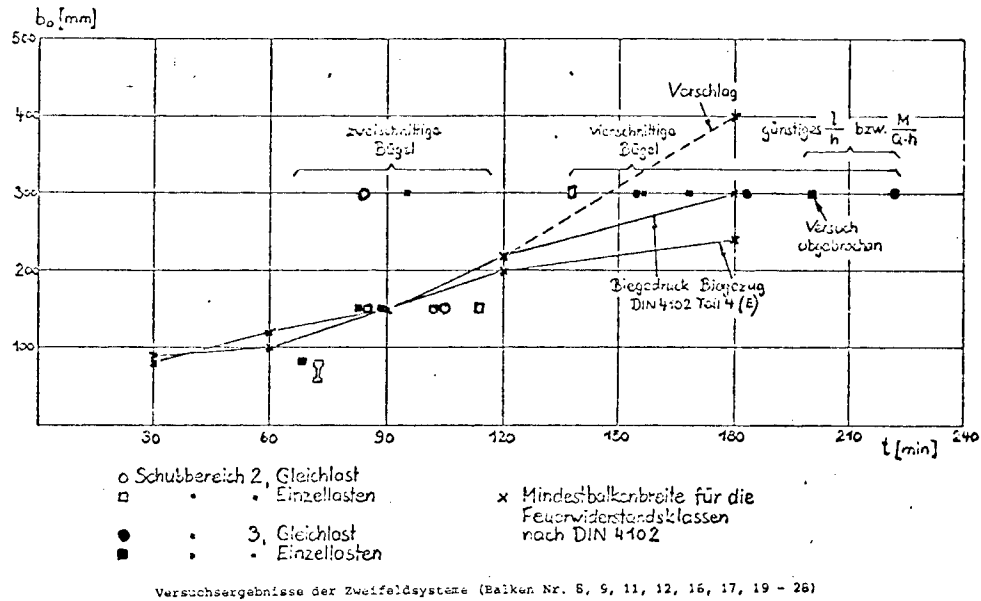
DIN 4102 geht von folgenden konstruktiven Maßnahmen aus, um das Brandverhalten von Stahlbetonbalken zu beeinflussen:

- Variation des Betonquerschnitts, insbesondere Forderung einer Mindestbalkenbreite,
- Variation der Betondeckung der Biegezugbewehrung; Forderung einer Mindestbetondeckung,
- Bewehrungsführung, insbesondere bei Durchlaufsystemen Verlängerung der Stützbewehrung.

Die beiden letztgenannten Parameter wurden bei den durchgeführten Versuchen nicht variiert, sondern gemäß DIN 4102 Teil 4 (E) gewählt.

### 2.2.1 Dreiseitig beanspruchte, statisch unbestimmt gelagerte Balken

Das Bild gibt einen Überblick über die bei unterschiedlicher Balkenbreite erzielten Versuchsergebnisse für Zweifeldbalken. Eingetragen ist ferner die in DIN 4102 Teil 4 (E) verlangte Mindestbreite von dreiseitig brandbeanspruchten, statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonbalken bestimmter Feuerwiderstandsdauer.



Es zeigt sich, daß für Feuerwiderstandsklassen  $\leq F 90$  die Gefahr vorzeitigen Schubversagens nicht gegeben ist, wenn nach dem vorliegenden Normentwurf konstruiert wird.

Für Balken der Feuerwiderstandsklasse F 120 und F 180 werden vierschnittige Bügel empfohlen, da sie in den Versuchen die Feuerwiderstandsdauer entscheidend verbessert haben. Die Betondeckung der außen- und untenliegenden Bügelschenkel braucht gegenüber den in DIN 1045 geforderten Mindestwerten nicht vergrößert zu werden, obwohl eine solche Maßnahme u. U. vergünstigenden Einfluß haben würde. Wegen des damit verbundenen Verlustes an statischer Balkenhöhe wie an für die Längsbewehrung verfügbarer Balkenbreite und der erforderlich werdenden zusätzlichen Schutzbewehrung der äußeren Betonschale wird von einer solchen Forderung abgesehen.

Die Mindestbalkenbreite von 300 mm genügt aber nicht, in jedem Belastungsfall ausreichende Sicherheit gegen vorzeitiges Schubversagen zu gewährleisten. Es wird daher eine Mindestbreite von  $b = 400$  mm empfohlen.

Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wurde zwar nicht in Versuchen direkt belegt. Durch den vergrößerten Querschnitt wird jedoch dessen Wärmekapazität erhöht und die Erwärmung deutlich verzögert. Das bedeutet sowohl für die im Stützbereich untenliegende Biegedruckzone einschließlich etwaiger Biegedruckbewehrung als auch für die Betondruckstreben eine höhere verbleibende Festigkeit. Entsprechendes gilt für die inneren Schenkel der vierschnittigen Bügel. Es darf daher erwartet werden, daß sich bei gleicher Beanspruchung der breitere Balken besser verhält als der schmalere.



Im Entwurf DIN 4102 Teil 4 werden bei hohen Feuerwiderstandsklassen für den Biegezugbereich geringere Mindestbalkenbreiten angegeben als für den Biegedruckbereich. Ob das hinsichtlich des Schubverhaltens immer zulässig ist, muß bezweifelt werden, da bei ungünstiger Laststellung (Einzellasten) auch im Biegezugbereich - gemeint ist hier der Bereich des Balkens, wo die Biegezugzone unten, in direkter Beflammung, liegt - hohe Querkraftbeanspruchung auftreten kann. Es wird daher vorgeschlagen, für die Feuerwiderstandsklassen F 120 und F 180 keine Unterscheidung dieser Art zu machen.

Somit ergeben sich folgende Empfehlungen für

- Mindestbreite b von dreiseitig beanspruchten, statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonbalken (Normalbeton)

F 30, F 60, F 90: keine besonderen Forderungen

F 120:  $b_{\min} = 220 \text{ mm}$

F 180:  $b_{\min} = 400 \text{ mm}$

- Mindestachsabstand u und Anordnung der Biegezugbewehrung für Balken der o. a. Art

F 30 - F 180: keine besonderen Forderungen

- Anordnung der Schubbewehrung (Bügel) für Balken der o. a. Art

F 30, F 60, F 90: keine besonderen Forderungen

F 120, F 180: für den Schubbereich 1 keine besonderen Forderungen,  
für die Schubbereiche 2 und 3 Anordnung von mindestens vierschnittigen Bügeln, deren Betondeckung gemäß DIN 1045 gewählt werden kann.

2.2.2 Dreiseitig beanspruchte, statisch bestimmt gelagerte Balken

Bei Einfeldsystemen kann mit ausreichender Wahrscheinlichkeit angenommen werden, daß die im Entwurf der DIN 4102 Teil 4 geforderten Mindestbalkenbreiten auch für die höheren Feuerwiderstandsklassen ausreichen. Das Brandverhalten der untersuchten F 90-Balken läßt diesen Schluß zu. Allerdings sollte auch hier auf die Anordnung von vierschnittigen Bügeln nicht verzichtet werden.

Die Empfehlungen lauten daher für

- Mindestbreite b und Stegdicke t von dreiseitig beanspruchten, statisch bestimmt gelagerten Stahlbetonbalken (Normalbeton)

F 30 - F 180: keine besonderen Forderungen

- Mindestachsabstand u und Anordnung der Biegezugbewehrung für Balken der o. a. Art

F 30 - F 180:            keine besonderen Forderungen

- Anordnung der Schubbewehrung (Bügel) für Balken der o. a. Art

F 30, F 60, F 90:    keine besonderen Forderungen

F 120, F 180:           für den Schubbereich 1 keine besonderen Forderungen,  
                         für die Schubbereiche 2 und 3 Anordnung von mindestens vierschnitt-  
                         tigen Bügeln, deren Betondeckung gemäß DIN 1045 gewählt werden  
                         kann.

2.2.3 Einachsig gespannte, statisch unbestimmt gelagerte Rippendecken

Besondere Aufmerksamkeit verdienen nach unten offene durchlaufende Stahlbetonrippendecken, die im Bereich negativer Momente Massiv- oder Halbmassivstreifen aufweisen. Für sie sind in DIN 4102 Teil 4 Vergünstigungen hinsichtlich der erforderlichen Rippenbreite vorgesehen. Dazu haben günstige Versuchsergebnisse, die im Rahmen der amtlichen Materialprüfung erzielt worden waren (nur teilweise veröffentlicht in [15]), geführt. Bedingt sollten diese Vergünstigungen auch hinsichtlich der Schubbeanspruchung gewährt werden:

Im Bereich negativer Momente (Gebrauchszustand) und großer Querkräfte stehen ausreichende Balkenbreiten (Halbmassivstreifen) zur Verfügung, so daß dieser Bereich nicht besonders betrachtet zu werden braucht. Am Anschnitt zum Halbmassivstreifen kann noch hohe Schubbeanspruchung vorhanden sein; Biegemomente werden dort aber erst im Verlauf der Brandbeanspruchung erzeugt. Die Gesamtbeanspruchung ist somit günstiger als bei einem normalen Durchlaufbalken, insbesondere bei Gleichlastbalken, bei denen im verbleibenden Restbereich die Schubbeanspruchung stetig bis zum Ort des maximalen Feldmoments abnimmt.

Für Gleichlastsysteme bestehen keine Bedenken, die vorgesehene Vergünstigungen zulassen.

Etwas ungünstiger liegen die Verhältnisse bei Einzellast - Rippendecken, bei denen volle Schubbeanspruchung bis zum Ort des maximalen Feldmoments vorhanden sein kann. Solche Systeme wurden bisher nicht untersucht, und es kann vorläufig für sie keine Vergünstigung empfohlen werden.

Es wird daher empfohlen, für

- Mindestbreite  $b$  von einachsig gespannten, statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonrippendecken (Normalbeton) ohne Zwischenbauteile mit Massiv- oder Halbmassivstreifen

F 30, F 60: keine besonderen Forderungen

F 90: keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung,

$b_{\min} = 150$  mm bei Decken mit großem Einzellastanteil,

F 120: keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung,  $b_{\min} = 220$  mm bei Decken mit großem Einzellastanteil,

F 180: keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung,  $b_{\min} = 400$  mm bei Decken mit großem Einzellastanteil.

- Mindestachsabstand  $u$  und Anordnung der Biegezugbewehrung für Decken der o. a. Art

F 30 - F 180: keine besonderen Forderungen.

- Anordnung der Schubbewehrung (Bügel) für Decken der o. a. Art

F 30, F 60, F 90: keine besonderen Forderungen

F 120, F 180: für den Schubbereich 1 keine besonderen Forderungen,  
für die Schubbereiche 2 und 3 Anordnung von mindestens vierschnittigen Bügeln, deren Betondeckung gemäß DIN 1045 gewählt werden kann.

- als "großer Einzellastanteil" möge ein Anteil von  $\geq 40$  % am Rechenwert der Schubspannung  $\tau_o$  verstanden sein.

2.2.4 Zweiachsig gespannte, einfeldrige Rippendecken

Einen weiteren Sonderfall stellen zweiachsig gespannte Rippendecken ohne Zwischenbauteile dar. Hier sind in Brandversuchen nur Einfeldsysteme untersucht worden [15], die ausgezeichnete Ergebnisse lieferten: bei 80 mm unterer Rippenbreite wurden Feuerwiderstandszeiten zwischen 102 min und  $> 150$  min erzielt. Schubbrüche traten dabei nicht auf. Erklärbar ist dieses günstige Verhalten durch die Flächensteifigkeit solcher Systeme, die bei der Ermittlung der Schnittgrößen für den Kaltzustand nicht angesetzt werden darf, sicher aber einen schätzenswerten Beitrag zur Gesamttraglast liefert.

Es scheint vertretbar, den in DIN 4102 Teil 4 vorgesehenen Vergünstigungen für diese Systeme zuzustimmen.

### 2.2.5 Zweiachsig gespannte, mehrfeldrige Rippendecken

Untersuchungsergebnisse liegen für solche Systeme nicht vor; es werden hier Analogieschlüsse versucht.

#### 2.2.5.1 Zweiachsig gespannte, mehrfeldrige Rippendecken mit Massiv- oder Halbmassivstreifen

Auch bei diesen Systemen ist ein positiver Einfluß der unter 2.2.4 genannten, nicht ansetzbaren Flächensteifigkeit auf das Brandverhalten anzunehmen. Für die Spannrichtung, in der eine Durchlauf- oder sonstige Einspannwirkung vorhanden ist, gelten außerdem die Ausführungen für die einachsigen Rippendecken-Durchlaufsysteme unter 2.2.3.

Es darf gefolgert werden, daß sich die zweiachsig gespannten unter Brandbeanspruchung besser verhalten als die einachsig gespannten Durchlauf decken (jeweils mit Massiv- oder Halbmassivstreifen), und es kann der vorgesehenen, etwas größeren Abminderung der erforderlichen Balkenbreite zugestimmt werden für Systeme mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung, wobei die kleinere Mindestrippenbreite auch für die Spannrichtung ohne Durchlaufwirkung eingesetzt werden darf. Aus den unter 2.2.3 genannten Gründen muß aber bei dem derzeitigen Stand der Kenntnisse für Systeme mit hohem Einzellastanteil eine Vergünstigung abgelehnt werden.

Es werden folgende Empfehlungen gegeben für

#### - Mindestrippenbreite $b$ von zweiachsig gespannten, mehrfeldrigen Stahlbetonrippendecken (Normalbeton) ohne Zwischenbauteile mit Massiv- oder Halbmassivstreifen

F 30, F 60:	keine besonderen Forderungen
F 90:	keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung, $b_{\min} = 150 \text{ mm}$ bei Decken mit großem Einzellastanteil
F 120:	keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung, $b_{\min} = 220 \text{ mm}$ bei Decken mit großem Einzellastanteil
F 180:	keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung, $b_{\min} = 400 \text{ mm}$ bei Decken mit großem Einzellastanteil.

#### - Mindestachsabstand $u$ und Anordnung der Biegezugbewehrung für Decken der o. a. Art

F 30 - F 180:	keine besonderen Forderungen
---------------	------------------------------

- Anordnung der Schubbewehrung (Bügel) für Decken der o. a. Art

F 30, F 60, F 90: keine besonderen Forderungen

F 120, F 180: für den Schubbereich 1 keine besonderen Forderungen,  
für die Schubbereiche 2 und 3 Anordnung von mindestens vierschnittigen Bügeln, deren Betondeckung gemäß DIN 1045 gewählt werden kann.

- Als "großer Einzellastanteil" möge ein Anteil von  $\geq 40\%$  am Rechenwert der Schubspannung  $\tau_o$  verstanden sein.

2.2.5.2 Zweiachsig gespannte, mehrfeldrige Rippendecken ohne Massiv- oder Halbmassivstreifen

Hier kann ein vergünstigender Einfluß auf das Tragverhalten unter Brandeinwirkung allein aus der Flächensteifigkeit (s. 2.2.4) abgeleitet werden. Einer vorsichtigen Abminderung der erforderlichen Mindestrippenbreiten, wie das in DIN 4102 Teil 4 vorgesehen ist, kann für Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung zugestimmt werden. Die vorgeschlagene Mindestbreite  $b = 310$  mm für die Feuerwiderstandsklasse F 180 ist sogar durch den Versuch Nr. 27 des hier vorgelegten Forschungsberichts belegt, wenn vierschnittige Bügel vorhanden sind. Für Decken mit hohem Einzellastanteil müssen die Forderungen, die für Durchlaufbalken gelten, beibehalten werden.

Danach ergeben sich die gleichen Empfehlungen, wie sie unter 2.2.5.1 zusammengestellt sind.

### 3. Folgerungen aus den Untersuchungsergebnissen.

- 3.1 Welche Empfehlungen können für die weitere Normungsarbeit bzw. hinsichtlich Ergänzung oder Änderung bestehender Normen, Richtlinien und dgl. gegeben werden ?**

Modifizierung der DIN 4102 (E) in einigen Punkten;  
siehe 2.2

- 3.2 Erscheinen weitere Arbeiten zur Abklärung offengebliebener Fragen, die mit den durchgeführten Untersuchungen im Zusammenhang stehen, erforderlich und welche Arbeiten sind besonders vorrangig ?**

Untersuchung des Einflusses der Schubzulagen nach Abschnitt 18.8, DIN 1045 Ausgabe Dezember 1978) wird z. Z. durchgeführt (Innenminister des Landes Nordrhein-Westfalen, V B I - 72.02 - Nr. 41/78 Teil IV)

- 3.3 Welche Folgerungen können für die Baupraxis aus den Untersuchungsergebnissen gezogen werden; hierbei ist auf bestehende Richtlinien besonders Rücksicht zu nehmen ?**

siehe Punkt 2

Neue Bezeichnung: INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU

DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTASY

30-0029/1-3-001

Untersuchungen über die Gefahr vorzeitigen Versagens  
infolge Schubbruches von Stahlbetonkonstruktionen  
unter Brandbeanspruchung

- Teil I bis III -

BIBLIOTHEK  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

B e r i c h t

erstattet von Dipl.-Ing. Lore Krampf

Oktober 1979

Die Untersuchungen wurden im Auftrage des Innenministeriums  
des Landes Nordrhein-Westfalen (Az. VB I - 72.02 - Nr. 41)  
durchgeführt.

Inhalt

	Seite
1 Allgemeines, Zweck der Untersuchungen . . . . .	4
2 Versuchsplanung und vorbereitung . . . . .	5
2.1 Versuchskörper . . . . .	5
2.1.1 Auswahl, Konstruktion und Abmessungen . . . . .	5
2.1.2 Baustoffe . . . . .	12
2.1.3 Meßquerschnitte . . . . .	12
2.1.4 Lagerung und Trocknung . . . . .	12
3 Versuchsaufbau und -durchführung . . . . .	14
3.1 Brandraum und Beheizung . . . . .	14
3.2 Einbau und Belastung der Versuchskörper . . . . .	14
3.3 Meßprogramm . . . . .	14
3.3.1 Messung der Brandraumtemperatur . . . . .	14
3.3.2 Messung der Betontemperatur . . . . .	15
3.3.3 Messung der Temperatur der Biegezugbewehrung . . . . .	15
3.3.4 Messung der Temperatur der Bügel . . . . .	15
3.3.5 Messung der vertikalen Verformung . . . . .	15
3.4 Sonstige Beobachtungen . . . . .	15
4 Versuchsergebnisse . . . . .	15
4.1 Brandraumtemperatur . . . . .	15
4.2 Betontemperatur . . . . .	16
4.3 Temperatur der Biegezugbewehrung . . . . .	16
4.4 Bügeltemperatur . . . . .	16
4.5 Vertikalverformung . . . . .	16
4.6 Sonstige Beobachtungen . . . . .	17
4.6.1 Versuchskörper 1 . . . . .	17
4.6.2 Versuchskörper 2 . . . . .	18
4.6.3 Versuchskörper 3 . . . . .	19
4.6.4 Versuchskörper 4 . . . . .	20
4.6.5 Versuchskörper 5 . . . . .	21
4.6.6 Versuchskörper 6 . . . . .	22
4.6.7 Versuchskörper 7 . . . . .	22
4.6.8 Versuchskörper 8 . . . . .	23
4.6.9 Versuchskörper 9 . . . . .	24
4.6.10 Versuchskörper 10 . . . . .	25
4.6.11 Versuchskörper 11 . . . . .	25
4.6.12 Versuchskörper 12 . . . . .	26
4.6.13 Versuchskörper 13 . . . . .	26
4.6.14 Versuchskörper 14 . . . . .	27
4.6.15 Versuchskörper 15 . . . . .	28
4.6.16 Versuchskörper 16 . . . . .	29



	Seite
4.6.17 Versuchskörper 17 . . . . .	31
4.6.18 Versuchskörper 18 . . . . .	32
4.6.19 Versuchskörper 19 . . . . .	34
4.6.20 Versuchskörper 20 . . . . .	35
4.6.21 Versuchskörper 21 . . . . .	36
4.6.22 Versuchskörper 22 . . . . .	38
4.6.23 Versuchskörper 23 . . . . .	40
4.6.24 Versuchskörper 24 . . . . .	41
4.6.25 Versuchskörper 25 . . . . .	42
4.6.26 Versuchskörper 26 . . . . .	43
4.6.27 Versuchskörper 27 . . . . .	45
4.6.28 Versuchskörper 28 . . . . .	46
5 Diskussion der Versuchsergebnisse . . . . .	47
5.1 Einfeldsysteme . . . . .	47
5.2 Mehrfeldsysteme . . . . .	50
5.2.1 Mehrfeldsysteme für die Feuerwiderstandsklassen $\leq F 90$ . . . . .	51
5.2.2 Mehrfeldsysteme für die Feuerwiderstandsklasse $F 180$ . . . . .	51
5.2.3 Tragwirkung der Zweifeldsysteme . . . . .	53
6 Empfehlungen für die Neufassung DIN 4102 Teil 4 . . . . .	54
6.1 Dreiseitig beanspruchte, statisch unbestimmt gelagerte Balken . . . . .	54
6.2 Dreiseitig beanspruchte, statisch bestimmt gelagerte Balken . . . . .	57
6.3 Einachsig gespannte, statisch unbestimmt gelagerte Rippendecken . . . . .	57
6.4 Zweiachsig gespannte, einfeldrige Rippendecken . . . . .	59
6.5 Zweiachsig gespannte, mehrfeldrige Rippendecken . . . . .	59
6.5.1 Zweiachsig gespannte, mehrfeldrige Rippendecken mit Massiv- oder Halbmassivstreifen . . . . .	59
6.5.2 Zweiachsig gespannte, mehrfeldrige Rippendecken ohne Massiv- oder Halbmassivstreifen . . . . .	61
6.6 Allgemeines zu den Empfehlungen für Rippendecken . . . . .	61
7 Schlußbemerkungen . . . . .	62
Literatur . . . . .	64
Verzeichnis der Anlagen . . . . .	66
Anlagen . . . . .	67

## 1. Allgemeines, Zweck der Untersuchungen

Die Neufassung der DIN 1045 (Ausgabe 1972) [1] bringt für die Bemessung auf Querkraft einige wesentliche Änderungen gegenüber der alten Norm.

Die höchstzulässigen Rechenwerte der Schubspannung  $\tau_0$  unter Gebrauchslast sind bei Balken höherer Betonfestigkeitsklassen erheblich heraufgesetzt.

In gewissen Grenzen des Rechenwertes der Schubspannung wird nur eine verminderte Schubdeckung gefordert, die durch bessere Anpassung an den wirklichen Kräfteverlauf vorher nicht ausgenutzte Reserven nunmehr in Anspruch nimmt.

Der Rechenwert der Querkraft darf - abhängig von der Lagerungsart - gegenüber der rechnerischen Auflagerkraft abgemindert werden bis zu dem Wert, der im Abstand  $0,5 h$  vom Auflagerrand auftritt.

Die neue Regelung führt in vielen Fällen zu erhöhter Beanspruchung des Betons im Bereich der "Druckstreben". Hinzu kommt, daß die Biegedruckzone nun höher als bisher ausgenutzt werden darf, so daß bei Biegegliedern im Bereich negativer Momente zwei für das Brandverhalten ungünstige Faktoren zusammentreffen können.

Gegenüber den früheren baupraktischen Gepflogenheiten wird jetzt häufig auf aufgebogene Stäbe der Biegezugbewehrung bei der Schubkraftdeckung völlig verzichtet. Die "Zugstreben" der erweiterten Fachwerkanalogie nach Rüscher/Kupfer werden vielmehr allein durch die Bügel gebildet, die i. a. an den Querschnittsrändern liegen und im Brandfall schnell auf Temperaturen, bei denen deutliches Absinken der Stahlfestigkeit auftritt, erwärmt werden.

Einem Sonderfall ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen: der Aufnahme vergrößerter Querkräfte, die durch Schnittkraftumlagerungen bei Durchlaufkonstruktionen unter Brandeinwirkung entstehen.

Es sind folgende Schubbrucharten zu unterscheiden (siehe auch [7]):

- Schubbiegebruch, entstehend, wenn die Druckzone durch sich verlängernde Schrägrisse eingeschnürt wird und zur Aufnahme der Biegedruck- und Schubdruckspannungen nicht mehr ausreicht,
- Schubbruch im Stegbereich infolge von schrägen Hauptdruckspannungen,

- Schubbruch im Stegbereich infolge Überbeanspruchung der Schubbewehrung (Bügel),
- Verankerungsbruch durch ungenügenden Verbund zwischen Stahl und Beton im Endbereich der Stahleinlagen.

Durch die Untersuchungen, über die hier berichtet wird, war zu prüfen, ob Stahlbetonbalken, die nach den neuen Regeln der DIN 1045 konstruiert werden und gleichzeitig nur die Mindestanforderungen erfüllen, die in DIN 4102 Teil 4 [2] erhoben werden sollen, im Brandfall ausreichende Sicherheit gegen vorzeitiges Schubversagen aufweisen.

Das Forschungsprogramm wurde in drei Teilen, über die hier zusammenfassend berichtet wird, durchgeführt. Die vorläufigen Berichte über Teil I und Teil II (Dezember 1975 und November 1977) werden hierdurch ersetzt.

## 2 Versuchsplanung und -vorbereitung

### 2.1 Versuchskörper

#### 2.1.1 Auswahl, Konstruktion und Abmessungen

Für die Untersuchungen wurden 28 Prüfkörper hergestellt. Eine Zusammenstellung ist in Tabelle 1 gegeben. Die dort aufgeführten laufenden Nummern 1 - 12 betreffen den ersten Teil des Forschungsauftrages, Nr. 13 - 18 den zweiten und 19 - 28 den dritten Teil.

Das Schubverhalten von Stahlbetonbalken wird durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Da die finanziellen Mittel verständlicherweise begrenzt waren, andererseits auch möglichst bald praktisch verwertbare Ergebnisse erwartet wurden, mußte das Versuchsprogramm so zusammengestellt werden, daß Grenzbereiche nach DIN 1045 abgetastet werden konnten im Hinblick auf eine Verträglichkeit mit Mindestforderungen der DIN 4102.

Es wurde eine mittlere Betonfestigkeitsklasse - B 25 - bevorzugt (Balken 1, 2, 5 - 27), bei Balken 3 und 4 wurde B 35 angestrebt, und Balken 28 wurde mit B 45 ausgeführt. In allen Fällen waren die Betonzuschläge im wesentlichen quarzitisch, und als Bindemittel wurde Portlandzement verwendet.

Tabelle 1: Zusammenstellung der untersuchten Balkensysteme

Allgemeine Angaben	Versuch Nr.	Querschnitt	System	Beton	Schubbereich	Schubspannung $\tau_0$ (N/m <sup>2</sup> )	Schubdeckungsgrad (n)	Feuerwiderstandsdauer (min)
direkte Lagerung  jeweils ein Endauflager (Mörtelbett) ungeschützt im Brandraum  desgl. Zwischenauflager bei Nr. 8 und 9  Stahl 420/500 RK  Biegezugbewehrung nicht im Feld gestaffelt; alle Stähle hinter dem Auflager verankert.  Schubdeckung allein durch Bügel	1			B 25	$\tau_{012} < \tau_0 < \tau_{02}$	1,2	0,67	85
	2				$\tau_0 = \tau_{02}$	1,8	1,0	90
	3				$\tau_{012} < \tau_0 < \tau_{02}$	1,2	0,5	88
	4		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 3,0$	B 35	$\tau_0 = \tau_{02}$	2,4	1,0	102
	5				$\tau_{012} < \tau_0 < \tau_{02}$	1,2	0,67	81
	6			B 25	$\tau_0 = \tau_{02}$	1,8	1,0	109 (halbe Last)
	7				$\tau_{012} < \tau_0 < \tau_{02}$	1,4	0,78	34
	8				$\tau_{012} < \tau_0 < \tau_{02}$	1,2	0,67	85
wie 1 - 9, jedoch Biegezugbewehrung im Feld gestaffelt	9			B 25	$\tau_{012} < \tau_0 < \tau_{02}$	1,2	0,67	104
	10		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$		$\tau_0 = \tau_{02}$	1,8	1,0	>>82 Versuch wegen Versagens der Brandraumabdeckung abgebrochen
	11		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$		$\tau_{012} < \tau_0 < \tau_{02}$	1,2	0,67	114
	12		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$		$\tau_0 = \tau_{02}$	1,8	1,0	102
	13		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 7$	B 25	$\tau_0 = \tau_{02}$	1,8	1,0	106
	14		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 7$		$\tau_0 = \tau_{02}$	1,8	1,0	112
wie 1 - 9, jedoch Biegezugbewehrung im Feld gestaffelt	15		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 24$		$\tau_0 = \tau_{02}$	1,8	0	96
wie 1 - 9, jedoch Biegezugbewehrung im Feld gestaffelt	16		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$	B 25	$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	89
	17		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$		$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	68
indirekte Lagerung sonst wie 1 - 9	18		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 3,0$		$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	80
wie 10 - 17	19		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$	B 25	$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	95
wie 10 - 17 jedoch Bügel vierschnittig	20		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$		$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	168
	21		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$		$\tau_0 = \tau_{02}$	1,8	1,0	137
wie 10 - 17, vierschn.Bügel +	22		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$	B 25	$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	156
wie 22 zusätzliche	23		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$		$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	155
wie 10 - 17, zweischn.Bügel +	24		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 10$		$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	84
wie 20/21	25		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 1,5$	B 25	$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	abgebrochen nach 200 Min.
	26		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 7$		$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	222
	27		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 10$		$\tau_0 = \tau_{03}$	3,0	1,0	183
wie 10 - 17	28		$\frac{M}{Q \cdot h} \sim 2,5$	B 45	$\tau_0 = \tau_{03}$	4,3	1,0	84

Die Schubbewehrung bestand im allgemeinen ausschließlich aus senkrechten Umschließungsbügeln; nur gelegentlich wurden zu Vergleichszwecken auch Schrägaufbiegungen angeordnet (Balken 22 - 24). Die Bügel wurden immer aus kaltverformtem Betonstahl BSt 420/500 RK hergestellt, während für die Biegezugbewehrung außer kaltverformtem gelegentlich auch naturharter Stahl BSt 420/500 RU benutzt wurde. Da das ohne Einfluß auf das Balkenverhalten sein mußte und auch war, werden diese Versuchskörper nicht besonders bezeichnet.

Hinsichtlich des Brandverhaltens wurde bevorzugt die Feuerwiderstandsklasse F 90 gemäß DIN 4102 Teil 2 (Balken 1 - 6, 8 - 16, 28), bei einigen Balken F 30 (Balken 7, 17, 18) und bei der letzten Gruppe F 180 (Balken 19 - 27) angestrebt. Die nach Teil 4 (E) dieser Norm dafür als erforderlich angesehenen Mindestbetonquerschnitte wurden benutzt, und die Biegezugbewehrung wurde mit entsprechender isolierender Betondeckung verlegt, jedoch nicht überbemessen, um eine mögliche unerwünschte Umlagerung von inneren Kräften zu verhindern.

Da sich eine vergrößerte Seitensteifigkeit versuchstechnisch günstig auswirkt, wurden zunächst Plattenbalkenquerschnitte gewählt (Balken 1 - 15), später wurde jedoch zu Rechteckbalken übergegangen (Balken 16, 19 - 28). Durch einige I-Balken wurde das Programm ergänzt (Balken 17, 18).

Zwei Grundsysteme von Balken wurden untersucht: der statisch bestimmt gelagerte Einfeldbalken (Balken 1 - 7, 10, 13 - 15, 18) und der statisch unbestimmte Zweifeldbalken mit gleicher Feldweite und symmetrischer Belastung (Balken 8, 9, 11, 12, 16, 17, 19 - 28). Alle Balken außer Nr. 18 wurden direkt gelagert.

Die untersuchten Zweifeldbalken stellen den ungünstigsten Fall von Durchlaufsystemen dar. Sie erleiden im Brandfall beim Anwachsen des Stützenmoments gleichzeitig den größtmöglichen Querkraftzuwachs im gleichen Bereich. Innenfelder erhalten weniger zusätzliche Beanspruchungen: bei einem symmetrisch belasteten, links und rechts gleichartig gestützten und eingespannten Feld findet gar keine Querkraftumlagerung statt.

Bei der ersten Gruppe der Balken wurde die gesamte Biegezugbewehrung der Feldmomente - auch die statisch nicht mehr erforderliche - hinter den Auflagern verankert (Balken 1 - 9, 18), bei den übrigen Prüfkörpern wurde die Feldbewehrung so weit wie möglich nach der Zugkraft-Deckungslinie gestaffelt, wobei die nicht mehr benötigten Stäbe stumpf endeten.

Die Schubbeanspruchung der Prüfkörper lag im Schubbereich 2 gemäß DIN 1045 (Balken 1 - 15, 21), wobei entsprechend dem Rechenwert der Schubspannung der Schubdeckungsgrad variiert wurde, und im Schubbereich 3 (Balken 16 - 20, 22 - 28). Der Schubbereich 1 wurde nicht untersucht, da die im unteren Bereich des Schubbereichs 2 liegenden Balken mit entsprechend verminderter Schubdeckung gegenüber den höher beanspruchten im Brandversuch kein unterschiedliches Verhalten zeigten. Eine Extrapolation dieses Verhaltens in den Schubbereich 1 erschien vertretbar, insbesondere, weil nach DIN 1045 immer eine Mindestverbügelung vorhanden sein muß.

Bei den im Schubbereich 3 liegenden Balken mußte eine Abweichung gegenüber der in DIN 1045 geforderten Mindestbalkendicke  $d_o = 450$  mm in Kauf genommen werden, da die Kapazitätsgrenze der Prüfeinrichtung erreicht war. Es wurde für vertretbar erachtet, in diesen Fällen mit  $d_o = 400$  mm zu arbeiten.

Die Balken wurden entweder durch Einzellasten (Balken 1 - 4, 8, 11 - 13, 16 - 23, 25, 28) oder durch gleichmäßig verteilte Belastung (Balken 5 - 7, 9, 10, 14, 15, 24, 26, 27) beansprucht. Die erzeugten Momenten-Schubverhältnisse  $M/Q \cdot h$  für die Einzellastbalken und die gewählten Balkenschlankheiten  $l/h$  für die Gleichlastbalken sind in den Bildern 1a und 1b dargestellt. Bei den Zweifeldsystemen bedeutet  $M$  in dem Ausdruck  $M/Q \cdot h$  jeweils das Moment über der Mittelstütze.

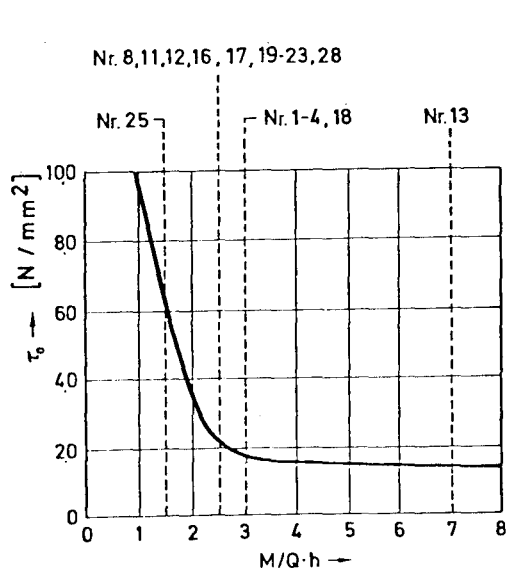


Bild 1a:

Abhängigkeit der Schubtragfähigkeit vom Momenten/Schubverhältnis bei Einzellastbalken ohne Schubbewehrung unter Normaltemperatur und Lage der unter Brandbelastung geprüften Balken

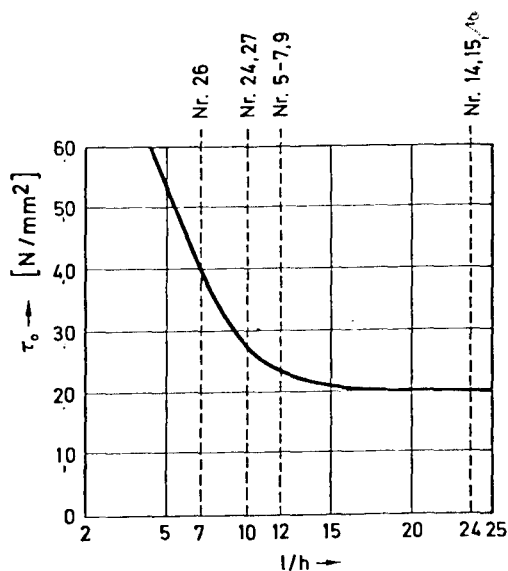


Bild 1b:

Abhängigkeit der Schubtragfähigkeit von der Balkenschlankheit bei Gleichlastbalken ohne Schubbewehrung unter Normaltemperatur und Lage der unter Brandbelastung geprüften Balken

In den beiden Bildern ist gleichzeitig die Abhängigkeit der Schubtragfähigkeit von den genannten Parametern bei Balken ohne Schubbewehrung unter Normaltemperatur nach [5 ff.] dargestellt.

Bei Balken in Raumtemperatur wurde für  $M/Q \cdot h \sim 2,5 - 3,0$  bei Untersuchung aller Parameter ein Minimum des Verhältnisses zwischen effektivem Bruchmoment  $M_{\text{eff}}$  und dem rechnerischen Biegebruchmoment  $M_{\text{Bu}}$  ermittelt. Das gilt sowohl für Einfeldsysteme [5] wie auch für Durchlaufbalken [11]. Daher wurden auch im hier vorgelegten Untersuchungsprogramm die meisten Balken für diesen  $M/Q \cdot h$ -Bereich ausgelegt. Denkt man sich bei den Gleichlastbalken die Belastung in den Viertelpunkten konzentriert [5], so liegen auch hier die meisten der untersuchten Balken mit  $l/h \sim 10$  im vermutlich ungünstigsten Bereich.

$$(Q = q \cdot 0,5 \, l = P$$

$$M = Q \cdot 0,25 \, l$$

$$l = 10 \, h$$

$$\frac{M}{Q \cdot h} = \frac{Q \cdot 0,25 \cdot 10 \, h}{Q \cdot h} = 2,5)$$

Punktuell wurden auch andere Bereiche untersucht.

In Tabelle 2 sind die statischen und konstruktiven Daten aller Prüfkörper zusammengestellt; als Anlagen 1.1 - 1.28 sind die Bewehrungspläne der Balken beigefügt.

Es wird darauf aufmerksam gemacht, daß bei den Zugkraftdeckungsbildern der geringfügige Einfluß des Balkeneigengewichts auf den Verlauf (parabelförmige Ausrundung) vernachlässigt wurde.

N.	System	Belastung	Stützweite l (m)	l/h	Nutzlast p (kN/m)	Laststellung a (m)	M/Q·h	Nutzlast P (kN)	Biegemoment		maßgebende Querkraft Q (kN)	Betondruckfestigkeits f <sub>td</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Stahlgüte BSt	Querschnitt (mm)						maßgebende Schubspannung τ <sub>0</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Schubbereich	Schubdeckungsgrad η	Schubbewehrung		Längsbewehrung				
									M <sub>Feld</sub> (kNm)	M <sub>Stütze</sub> (kNm)				b	b <sub>0</sub>	d	d <sub>0</sub>	h	z				Bügel φ	e (mm)	Schrägaufbiegung	A <sub>sFeld</sub>	A <sub>sFeld</sub>	A <sub>sStütze</sub>	A <sub>sStütze</sub>
1	Einfeld	Einzellasten	3,0			0,75	3,0	34,7	27,6		36,8	25,3 <sup>4)</sup> (B 25)	420/500	300	150	80	300	245	205	1,2	2	0,67	6	110 <sup>7)</sup>		1 Ø 20 1 Ø 18			
2	Einfeld	Einzellasten	3,0			0,75	3,0	52,4	42,4		54,5	25,3 <sup>4)</sup> (B 25)	420/500	300	150	80	300	242	202	1,8	2	1,0	10	139 <sup>7)</sup>		1 Ø 25 1 Ø 22			
3	Einfeld	Einzellasten	3,0			0,75	3,0	34,7	27,6		36,8	28,0 <sup>4)</sup> (B 35)	420/500	300	150	80	300	245	205	1,2	2	0,5	6	150 <sup>7)</sup>		1 Ø 20 1 Ø 18			
4	Einfeld	Einzellasten	3,0			0,75	3,0	67,4	52,1		69,5	28,0 <sup>4)</sup> (B 35)	420/500	300	150	80	300	233	193	2,4	2	1,0	10	105 <sup>7)</sup>		2 Ø 28			
5	Einfeld	Gleichlast	3,0	12	26,4				31,3		36,8 <sup>3)</sup>	25,3 <sup>4)</sup> (B 25)	420/500	300	150	80	300	245	205	1,2	2	0,67	6	110 - 240		1 Ø 28			
6	Einfeld	Gleichlast	3,0	12	39,7				46,2		54,5 <sup>3)</sup>	25,3 <sup>4)</sup> (B 25)	420/500	300	150	80	300	242	202	1,8	2	1,0	8 - 6	90 - 240		2 Ø 25			
7	Einfeld	Gleichlast	3,0	12	17,8				21,6		25,4 <sup>3)</sup>	25,3 <sup>4)</sup> (B 25)	420/500	300	80	80	300	268	227	1,4	2	0,78	6	150 - 240		1 Ø 22			
8	Zweifeld	Einzellasten	2,50			1,05 <sup>1)</sup>	2,5	51,6	17,7	26,1	41,4	25,3 <sup>4)</sup> (B 25)	420/500	300	150	80	300	271	230	1,2	2	0,67	6	110 <sup>8)</sup>		1 Ø 16 1 Ø 14		1 Ø 16 2 Ø 14	
9	Zweifeld	Gleichlast	3,0	12	23,3				15,6	27,8	41,4 <sup>3)</sup>	25,3 <sup>4)</sup> (B 25)	420/500	300	150	80	300	271	230	1,2	2	0,67	6	110-240 <sup>8)</sup>		1 Ø 14 1 Ø 12		3 Ø 16	
10	Einfeld	Gleichlast	5,0	24	19,6				65,7		48,8 <sup>3)</sup>	39,6 <sup>5)</sup> (B 25)	420/500	300	150	300	150	210	180	1,8	2	1,0	8 - 6	90 - 240		2 Ø 22 2 Ø 20 2 Ø 12	2 Ø 18		
11	Zweifeld	Einzellasten	2,50			1,05 <sup>1)</sup>	2,5	51,6	17,7	26,1	41,4	39,6 <sup>5)</sup> (B 25)	420/500	300	150	300	150	271	230	1,2	2	0,67	6	110 <sup>8)</sup>		1 Ø 16 1 Ø 14		1 Ø 16 1 Ø 14	
12	Zweifeld	Einzellasten	2,50			1,05 <sup>1)</sup>	2,5	77,7	26,3	38,8	62,0	39,6 <sup>5)</sup> (B 25)	420/500	300	150	300	150	270	230	1,8	2	1,0	8	90 <sup>8)</sup>		1 Ø 16 2 Ø 14		1 Ø 20 2 Ø 18	
13	Einfeld	Einzellasten	5,0			1,50	7,0	50,4	80,1		54,0	32,7	420/500	300	150	300	150	210	180	1,8	2	1,0	8	90 <sup>7)</sup>		2 Ø 22 2 Ø 20 2 Ø 18	3 Ø 20		
14	Einfeld	Gleichlast	5,0	24	19,6				65,7		48,8 <sup>3)</sup>	32,7	420/500	300	150	300	150	210	180	1,8	2	1,0	8 - 6	90 - 240		2 Ø 22 2 Ø 20 2 Ø 12	2 Ø 18		

- 1) Abstand von der Mittelstütze
- 2) aus versuchstechnischen Gründen Nutzlast P auf zwei Lasteintragungspunkte aufgeteilt
- 3) bei Gleichlast gemäß DIN 1045, Abschn. 17.5 abgemindert
- 4) angestrebte Betonfestigkeitsklasse nicht erreicht

- 5) angestrebte Betonfestigkeitsklasse deutlich überschritten
- 6) I-Querschnitt, vgl. Anlagen 1.17 und 1.18
- 7) im Bereich hoher Schubbeanspruchung
- 8) im Bereich der Mittelstütze
- 9) vierschnittige Bügel



Nr.	System	Belastung	Stützweite l (m)	f/h	Nutzlast P (kN/m)	Laststellung a (m)	M/Q-h	Nutzlast P (kN)	Biegemoment		maßgebende Querkraft Q (kN)	Reondruck- festigkeit $R_{yk}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Stahlgüte RSt	Querschnitt (mm)						maßgebende Schubspannung $\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	Schub- bereich	Schub- deckungs- grad n	Schubbewehrung			Längsbewehrung			
									M <sub>Feld</sub> (kNm)	M <sub>Stütze</sub> (kNm)				b	b <sub>0</sub>	d	d <sub>0</sub>	h	z				Bügel Ø	e (mm)	Schräg- aufbiegung	A <sub>sFeld</sub>	A <sub>sFeld</sub>	A <sub>sStütze</sub>	A <sub>sStütze</sub>
15	Einfeld	Gleichlast	5,0	24	19,6				65,7		48,8 <sup>3)</sup>	32,7	420/500	300	150	300	150	210	180	1,8	2	0				2 Ø 22 2 Ø 20 2 Ø 12	2 Ø 18		
16	Zweifeld	Einzellasten	3,0			1,75 <sup>1)</sup>	2,5	224,0	115,8	117,9	135,0	32,6	420/500	150		400				3,0	3	1,0	10	83 <sup>8)</sup>		2 Ø 25 2 Ø 22	2 Ø 22	2 Ø 25 2 Ø 22	2 Ø 22
17	Zweifeld	Einzellasten	3,0			1,87 <sup>1)</sup>	2,5	130,2	71,0	68,4	76,6	31,5	420/500	180 <sup>6)</sup>	t = 80	400	80	365	325	3,0	3	1,0	8	100 <sup>3)</sup>		1 Ø 22 2 Ø 20		3 Ø 20	
18	Einfeld	Einzellasten	3,0			1,20	3,0	81,9	99,9		84,0	31,5	420/500	180 <sup>6)</sup>	t = 80	450	80	390	350	3,0	3	1,0	8	100 <sup>7)</sup>		2 Ø 25 2 Ø 22			
19	Zweifeld	Einzellasten	3,0			1,75 <sup>1)</sup>	2,45	427,6 <sup>2)</sup>	154,9	210,6	252,0	32,2	420/500	300		400		350	280	3,0	3	1,0	12	60 <sup>8)</sup>		4 Ø 25	2 Ø 16	5 Ø 28	2 Ø 25
20	Zweifeld	Einzellasten	3,0			1,75 <sup>1)</sup>	2,5	427,6 <sup>2)</sup>	154,9	210,6	252,0	32,2	420/500	300		400		350	280	3,0	3	1,0	12	120 <sup>8)9)</sup>		4 Ø 25	2 Ø 16	5 Ø 28	2 Ø 25
21	Zweifeld	Einzellasten	3,0			1,75 <sup>1)</sup>	2,5	265,0	138,3	140,8	162,0	32,2	420/500	300		400		350	300	1,8	2	1,0	10	140 <sup>8)9)</sup>		3 Ø 25 2 Ø 20	2 Ø 12	3 Ø 25 2 Ø 22	2 Ø 20
22	Zweifeld	Einzellasten	3,0			1,75 <sup>1)</sup>	2,5	418,0	215,7	219,4	252,2	33,8	420/500	300		400		350	280	3,0	3	1,0	10	180 <sup>8)9)</sup>	4 Ø 28	3 Ø 28 3 Ø 25	3 Ø 25	3 Ø 28 3 Ø 25	3 Ø 25
23	Zweifeld	Einzellasten	3,0			1,75 <sup>1)</sup>	2,5	418,0	215,7	219,4	252,2	33,8	420/500	300		400		350	280	3,0	3	1,0	10	180 <sup>8)9)</sup>	4 Ø 28 4 Ø 20	3 Ø 28 3 Ø 25	3 Ø 25	3 Ø 28 3 Ø 25	3 Ø 25
24	Zweifeld	Gleichlast	3,0	10	142,0				124,5	222,0	252,2 <sup>3)</sup>	33,8	420/500	300		400		350	280	3,0	3	1,0	10	330 <sup>8)</sup>	2 Ø 28 2 Ø 25	4 Ø 25		4 Ø 28 2 Ø 25	3 Ø 25
25	Zweifeld	Einzellasten	3,0			0,75 <sup>1)</sup>	1,5	270,0	53,0	136,0	252,2	34,5	420/500	300		400		350	280	3,0	3	1,0	12	110 <sup>8)9)</sup>		2 Ø 22		2 Ø 28 2 Ø 25	2 Ø 22
26	Zweifeld	Gleichlast	2,5	7	192,5				85,8	153,0	252,2 <sup>3)</sup>	34,5	420/500	300		400		350	280	3,0	3	1,0	10	85 <sup>8)9)</sup>		4 Ø 20		4 Ø 28	2 Ø 20
27	Zweifeld	Gleichlast	3,5	10	128,8				113,8	202,0	252,2 <sup>3)</sup>	34,5	420/500	300		400		350	280	3,0	3	1,0	10	85 <sup>8)9)</sup>		2 Ø 25 2 Ø 22		5 Ø 28	2 Ø 25
28	Zweifeld	Einzellasten	3,0			1,75 <sup>1)</sup>	2,5	322,4 <sup>2)</sup>	116,5	158,0	189,0	46,8 <sup>4)</sup>	420/500	150		400		350	280	4,5	3	1,0	12	80 <sup>8)</sup>		2 Ø 25 2 Ø 22	2 Ø 14	4 Ø 28	2 Ø 25

1) Abstand von der Mittelstütze

2) aus versuchstechnischen Gründen Nutzlast P auf zwei Lasteintragungspunkte aufgeteilt

3) bei Gleichlast gemäß DIN 1045, Abschn. 17.5 abgemindert

4) angestrebte Betonfestigkeitsklasse nicht erreicht

5) angestrebte Betonfestigkeitsklasse deutlich überschritten

6) I-Querschnitt, vgl. Anlagen 1.17 und 1.18

7) im Bereich hoher Schubbeanspruchung

8) im Bereich der Mittelstütze

9) vierschnittige Bügel

### 2.1.2 Baustoffe

Im allgemeinen wurde Transportbeton verwendet, nur der B 45-Balken Nr. 28 wurde mit im Institut hergestelltem Beton ausgeführt. In allen Fällen handelte es sich um vorwiegend quarzitisches Zuschläge aus Gruben des Braunschweiger Raums und des Vorharzes.

Als Bindemittel wurde Portlandzement PZ 35 F benutzt.

Dem Beton für die Balken 7, 17 und 18 mit nur 80 mm breiten Stegen wurde ein Verflüssiger zugesetzt.

Die angestrebte Festigkeitsklasse wurde nicht in allen Fällen erreicht. Sofern Zweifel bestanden, wurde durch Kugelschlagprüfung untersucht, ob die Balken zum Versuchstermin eine für ihre Gebrauchsbeanspruchung ausreichende Festigkeit besaßen.

Vorgesehen war für alle Versuchskörper kaltverformter Betonstahl BSt 420/500 RK. Es ergaben sich jedoch in einigen Fällen Lieferschwierigkeiten, so daß für die Biegezugbewehrung teilweise auf naturharten Stahl gleicher Festigkeit ausgewichen wurde, da hieraus keine Beeinflussung des Schubverhaltens zu erwarten war. Für die Bügel wurde ausschließlich kaltverformter Stahl eingesetzt.

Tabelle 3 zeigt stichprobenartig die Kennwerte des Stahls unter Normaltemperatur.

### 2.1.3 Meßquerschnitte

In allen Prüfkörpern wurden Fe-Konst.-Thermoelemente an den Bügeln und der untenliegenden Biegezugbewehrung, in einigen Balken auch im Betonquerschnitt (Feldmitte und über einem Auflager), einbetoniert zur Messung des Temperatur-Zeit-Verlaufs. Die Lage der Meßstellen ist den Anlagen 3 bis 5 zu entnehmen.

### 2.1.4 Lagerung und Trocknung

Die Versuchskörper wurden in einer geschlossenen Halle gelagert, die annähernd das Normklima 20/65 aufwies. Die Lagerungszeit betrug mindestens 3 Monate, um eine genügende Austrocknung zu gewährleisten.

Tabelle 3: Kennwerte des eingebauten Betonstahls

Zu Versuchs- körpern Nr.	Stahl- sorte	$\varnothing$ [mm]	$R_{O,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_z$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\delta_{10}$ [%]
1 - 9	420/500 RK	6	456,2	534,3	10,9
		8	473,3	563,7	11,3
		10	436,0	514,5	12,5
		12	408,2	509,5	13,4
		14	416,1	515,9	14,6
		16	423,8	527,9	16,0
		18	468,6	570,9	12,8
		22	447,9	559,3	13,4
		28	414,1	510,1	13,6
10 - 12	420/500 RK	14	444,9	565,2	15,0
		18	440,6	532,6	11,7
		20	432,2	518,8	13,0
		22	476,6	536,5	12,3
13 - 15	420/500 RK	6	458,6	539,7	13,3
		8	427,7	506,9	11,3
		10	452,9	545,9	13,0
		12	438,7	537,1	14,2
		18	429,1	530,7	13,3
		20	424,9	520,8	12,0
		22	491,0	598,5	13,6
16 - 18	420/500 RK	8	450,9	539,0	11,6
		10	412,4	512,7	13,3
		16	437,5	549,4	14,7
		20	426,9	537,9	14,4
		22	488,3	581,1	12,2
		25	476,9	578,3	13,6
19 - 21	420/500 RK	10	400,1	492,8	13,5
		12	407,0	486,8	13,1
		20	426,7	521,7	14,2
		22	466,4	562,5	11,8
		25	451,5	532,7	13,8
		28	465,3	564,9	13,2
22 - 24	420/500 RK	10	449,2	517,4	12,0

### 3. Versuchsaufbau und Durchführung

#### 3.1 Brandraum und Beheizung

Die Versuchskörper wurden als obere Abdeckung einer Brandkammer von 4,0 m Breite und 1,7 m Höhe eingebaut. Die Brandkammerlänge war - abhängig von der Prüfkörperlänge - unterschiedlich. Die nicht vom Prüfkörper überdeckte Restfläche der Kammer war mit Gasbetonplatten abgedeckt. Die innere Ausmauerung dreier Brandraumwände und des Bodens bestand aus Hartschamotte, während die vierte - nicht ortsfeste - Wand und bei den Durchlaufbalken auch das Mittelaufleger mit Gasbetonplatten bekleidet waren.

Die Beheizung erfolgte durch je 3 bis 5 Ölbrenner an den beiden Längsseiten unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 51 603 und folgte der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102 bzw. ISO St. 834. Die Flammenachsen verliefen horizontal, 0,67 m über dem Brandkammerboden, senkrecht zur Längsachse der Prüfkörper. Die Flammenlänge betrug i. a. etwa 0,8 bis 1,0 m. Die Rauchgase wurden durch Abzüge am Boden des Brandraumes abgesaugt.

#### 3.2 Einbau und Belastung der Versuchskörper

Die Versuchsbalken wurden so eingebaut, daß ein Endauflager und bei den Durchlaufbalken auch das Mittelaufleger ungeschützt im Brandraum waren. Die genannten Auflager waren als Mörtelbett ausgebildet. Das andere Endauflager war ein Rollenlager und lag - gegen übermäßige Erwärmung geschützt - außerhalb des Brandraumes. Bei Balken 18 befand sich nur das "indirekte Lager" unter Beflammung.

Die Belastung wurde durch hydraulische Pressen aufgebracht und während des Versuchs konstant gehalten.

Die Belastungsschemata sind Tabelle 1 zu entnehmen. Die Gleichlasten wurden durch vier gleiche Einzellasten in den ungeraden Achtelpunkten jedes Feldes simuliert.

Das Prinzip des Versuchsaufbaus ist auf den Anlagen 2.1 und 2.2 dargestellt.

#### 3.3 Meßprogramm

Das Meßprogramm umfaßte folgende Aufgaben:

##### 3.3.1 Messung der Brandraumtemperatur

Mit NiCr-Ni-Thermoelementen wurde an mindestens sechs Meßstellen (vgl. Anlagen 2) die Brandraumtemperatur kontrolliert. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, daß auch im Bereich der ungeschützten Auflager, wo große Wandmassen

den Temperaturverlauf beeinflussen, die Temperaturentwicklung verfolgt wurde. Die Messungen dienten gleichzeitig zur Steuerung der Einheitstemperaturzeitkurve.

### 3.3.2 Messung der Betontemperatur

Bei einigen Versuchen (Balken 1 - 9) wurde mittels Fe-Konst.-Thermoelementen die Erwärmung des Betons gemessen. Die Thermoelemente wurden in der senkrechten Achse des Querschnitts in Balkenmitte und über dem ungeschützten Auflager angebracht.

### 3.3.3 Messung der Temperatur der Biegezugbewehrung

Zur Messung der Stahltemperatur dienten Fe-Konst.-Thermoelemente an ausgewählten Stäben der Feldbewehrung jeweils in Feldmitte und am Stabende, soweit es sich im Feldbereich befand.

### 3.3.4 Messung der Temperatur der Bügel

Der Anstieg der Bügeltemperatur wurde an den senkrechten Bügelschenkeln in halber Balkenhöhe und an den unteren waagerechten Schenkeln in Balkenmitte sowie gelegentlich in den unteren Bügelecken durch Fe-Konst.-Thermoelemente gemessen.

### 3.3.5 Messung der vertikalen Verformung

Mit Hilfe feiner Stahldrähte, die von der jeweiligen Meßstelle zu Rollenmeßgeräten geführt waren, wurde die vertikale Durchbiegung in Feldmitte der Balken gemessen. Sofern wegen der Belastungseinrichtung die Meßstelle nicht genau in Feldmitte angebracht werden konnte, erfolgte die Messung an einem definierten Punkt möglichst nahe der Feldmitte.

## 3.4 Sonstige Beobachtungen

Das Verhalten der Balken wurde während der Versuche dauernd kontrolliert; insbesondere wurden Feuchtigkeitsaustritt, Rißbildungen und Abplatzungen beobachtet.

## 4. Versuchsergebnisse

### 4.1 Brandraumtemperatur

Trotz der ungünstigen Brandraumbedingungen, die sich durch die Einbauten von Auflagerwänden ergaben, deren Massen mit erwärmt werden mußten, gelang es immer, im Laufe des Versuchs eine befriedigend gleichmäßige Temperatur längs der Balkenachse zu erreichen, d. h. nach Durchlaufen einer mehr oder weniger uneinheitlichen Anfangsphase lagen die Temperaturmeßwerte auch der gestörten Bereiche innerhalb der Toleranz der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN 4102 Teil 2.

Auf eine Darstellung des Brandraumtemperaturverlaufs wird verzichtet.

#### 4.2 Betontemperatur

Die Messung der Betontemperatur in einigen Querschnittspunkten in Feldmitte und über dem Balkenaufleger diente nicht zur Ausmessung von Temperaturfeldern, sondern sollte nur Aufschluß darüber geben, ob im Auflagerbereich wegen des Wärmeabflusses in die Wand deutlich geringere Querschnittserwärmung auftritt als im Feldbereich. Wie die Anlagen 3.6 - 3.8 (Balken 6, 7, 8), die auch die übrigen Messungen repräsentieren, zeigen, wurde jedoch eine befriedigende Übereinstimmung der Erwärmung jeweils entsprechender Querschnittspunkte erzielt.

Ein vergünstigender Einfluß auf die Versuchsergebnisse durch geringere Erwärmung der hoch-schubbeanspruchten Balkenbereiche ist danach auszuschließen.

#### 4.3 Temperatur der Biegezugbewehrung

Der Temperaturverlauf an der untenliegenden Biegezugbewehrung in Feldmitte wurde verfolgt, um Referenzwerte bei Biegebrüchen zu erhalten. An den Enden der gestaffelten Feldbewehrung wurde die Temperatur gemessen, um entsprechende Werte bei beobachtetem Schlupf der Bewehrung oder bei Verankerungsbrüchen zu haben.

Für alle Balken, die durch Biegebruch versagten (Balken 1 - 7, 13, 14), ist der Temperaturverlauf auf den Anlagen 4.1 - 4.14 dargestellt.

#### 4.4 Bügeltemperatur

Der Verlauf der Temperatur an den Bügeln ist auf den Anlagen 5.1 - 5.28 dargestellt. Wegen der Vielzahl der Meßpunkte ist jeweils der Mittelwert und der Streubereich jeder Gruppe von Meßpunkten - senkrechte Bügelschenkel, waagerechte Bügelschenkel, Bügelecken ... - gezeigt. Die beim Versagen der Prüfkörper erreichte Bügeltemperatur (Mittelwert) ist angegeben.

Auf eine gesonderte Darstellung der Temperaturentwicklung an den auflagernahen Bügeln wurde verzichtet, da sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den übrigen ergab (vgl. 4.2).

#### 4.5 Vertikalverformung

Die Vertikalverformung der Versuchskörper in Feldmitte bzw. nahe der Feldmitte ist auf den Anlagen 6.1 - 6.28 dargestellt.

#### 4.6.2 Versuchskörper 1 (Einfeldbalken, Bilder 4 und 5)

#### 4.6 Sonstige Beobachtungen

##### 30. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;

#### 4.6.1 Versuchskörper 1 (Einfeldbalken, Bilder 2 und 3)

23. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;

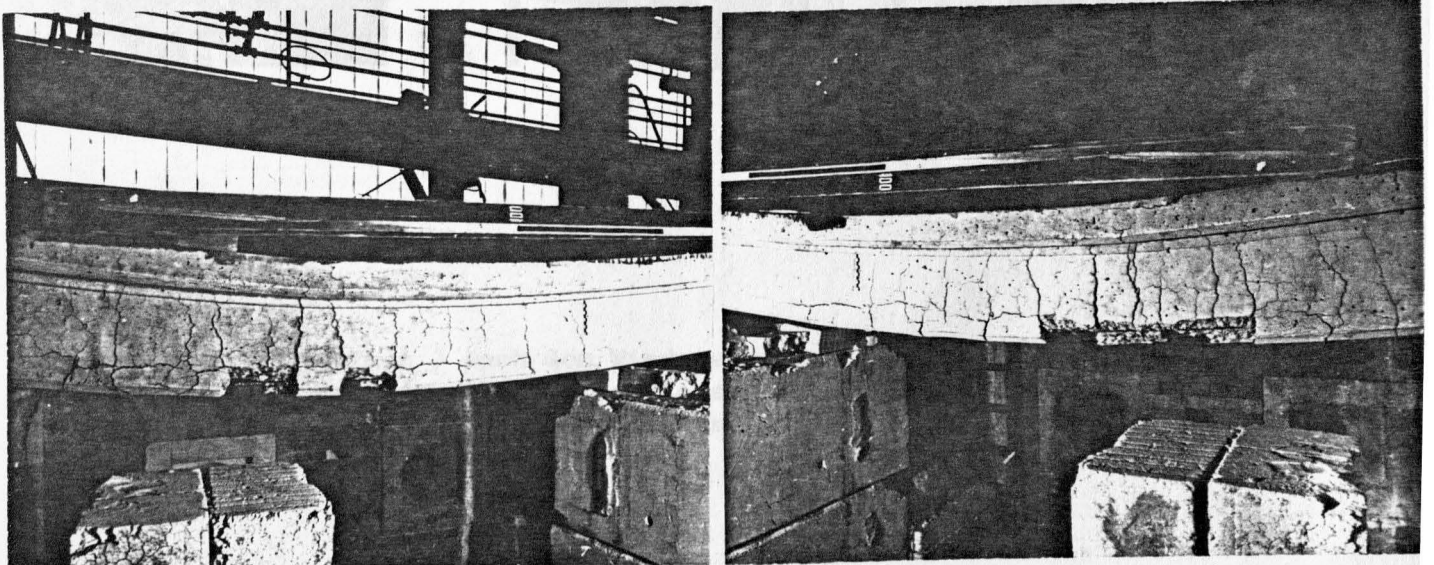
55. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;

59. Versuchsminute: senkrechte Risse werden weiter;

70. Versuchsminute: Schrägrisse im Auflagerbereich;

85. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Mittelbereich.

Die beobachteten Schrägrisse führten nicht zum Versagen, dieses wurde vielmehr durch den Beginn des Fließens der Biegezugbewehrung bei einer mittleren Stahltemperatur von  $585^{\circ}\text{C}$  eingeleitet. Die Bügel wurden über  $630^{\circ}\text{C}$  erwärmt, ohne daß Fließerscheinungen beobachtet wurden.

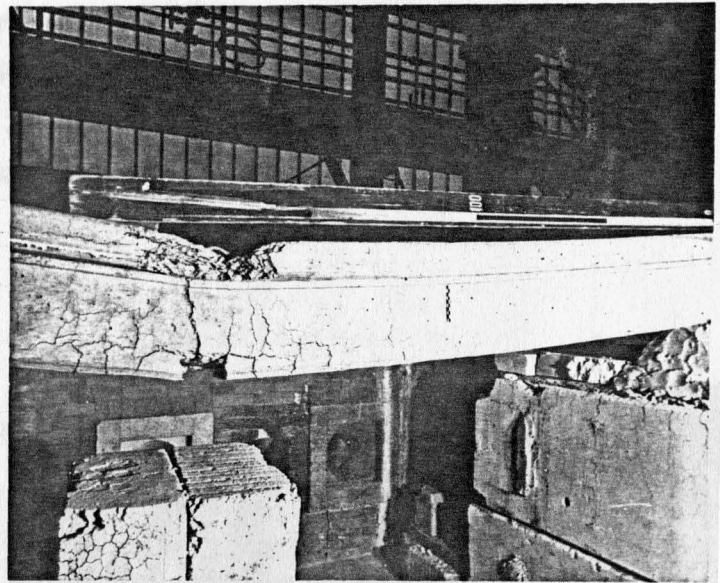
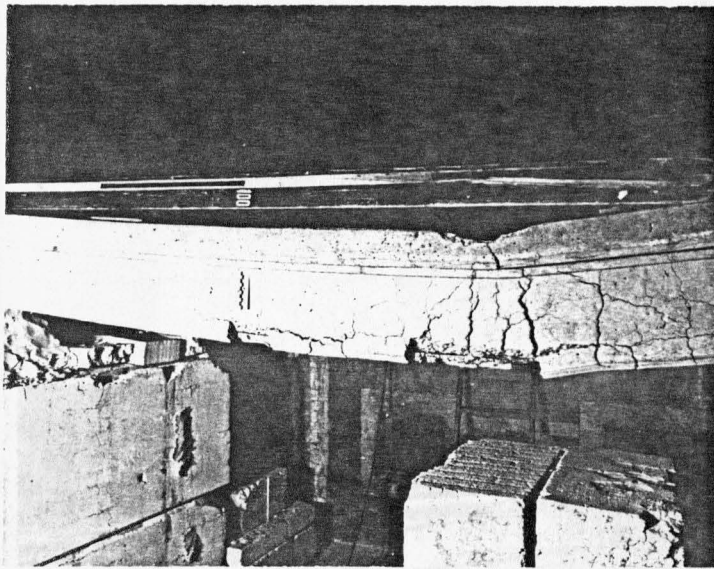


Bilder 2 und 3: Balken 1 nach dem Wiedererkalten. Die Betonbrocken aus der Biegezugzone fielen im Augenblick des Bruchs heraus.



#### 4.6.2 Versuchskörper 2 (Einfeldbalken, Bilder 4 und 5)

30. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;  
59. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;  
70. Versuchsminute: senkrechte Risse werden weiter;  
90. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Mittelbereich.



Bilder 4 und 5: Balken 2 nach dem Wiedererkalten. Das Versagen der Biegedruckzone erfolgte sekundär. Die Betonbrocken außerhalb des Bügelkorbes fielen während des Bruchvorgangs heraus.

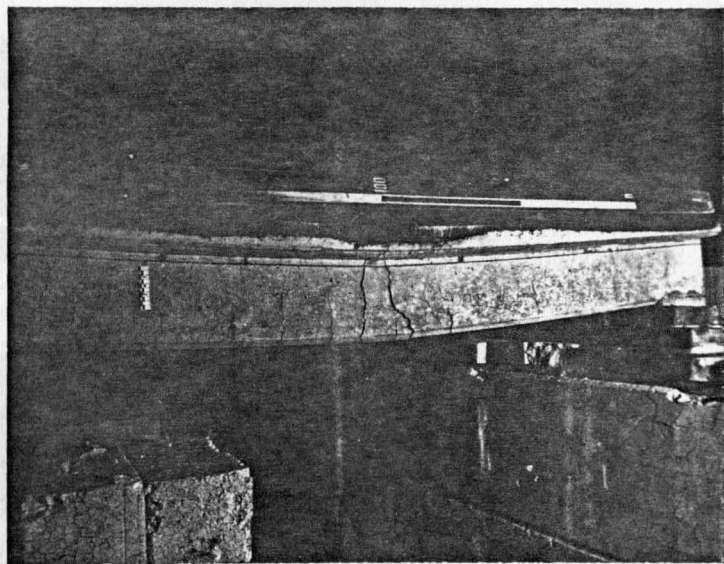
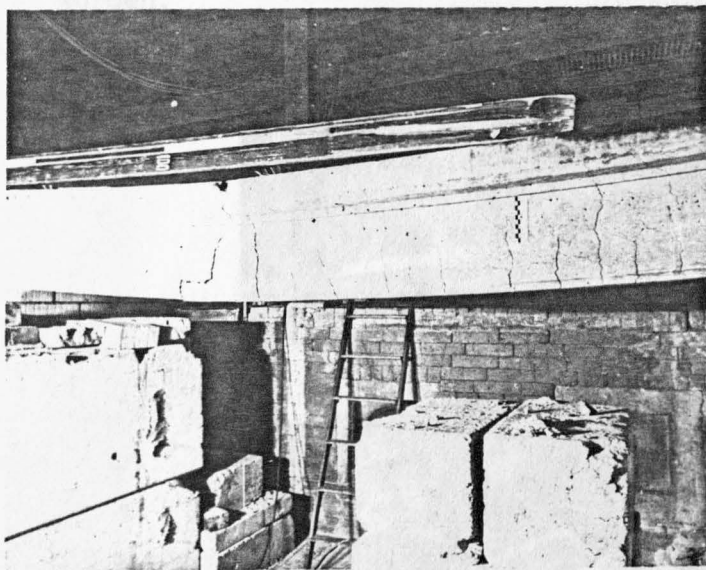


#### 4.6.3 Versuchskörper 3 (Einfeldbalken, Bilder 6 und 7)

- 45. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;
- 53. Versuchsminute: netzartige Rißbildung;
- 63. Versuchsminute: Risse im Mittelbereich etwas geweitet;
- 73. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;
- 74. Versuchsminute: Schrägrisse im Auflagerbereich;
- 88. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Mittelbereich.

Die beobachteten Schrägrisse führten nicht zum Versagen, dieses wurde vielmehr durch den Beginn des Fließens der Biegezugbewehrung bei einer mittleren Stahltemperatur von  $640^{\circ}\text{C}$  eingeleitet.

Die Bügel wurden über  $620^{\circ}\text{C}$  erwärmt, ohne daß Fließerscheinungen beobachtet wurden.



Bilder 6 und 7: Balken 3 nach dem Wiedererkalten

Bild 8: Balken 4 nach dem Wiedererkalten. Die Biegezugbewehrung versagte sekundär

#### 4.6.4 Versuchskörper 4 (Einfeldbalken, Bild 8)

- 12. Versuchsminute: Rußfärbung läßt schwach geneigte Risse zwischen Lastpunkt und Auflager vermuten;
- 36. Versuchsminute: Ruß weggebrannt, Risse nicht mehr zu sehen;
- 45. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;
- 50. Versuchsminute: netzartige Rißbildung;
- 60. Versuchsminute: Schrägrisse im Auflagerbereich;
- 63. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;
- 85. Versuchsminute: Risse weiten sich;
- 102. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Mittelbereich.

Die beobachteten Schrägrisse führten nicht zum Versagen, dieses wurde vielmehr durch den Beginn des Fließens der Biegezugbewehrung bei einer mittleren Temperatur von  $530^{\circ}\text{C}$  eingeleitet.

Die Bügel wurden über  $685^{\circ}\text{C}$  erwärmt, ohne daß Fließerscheinungen beobachtet wurden.

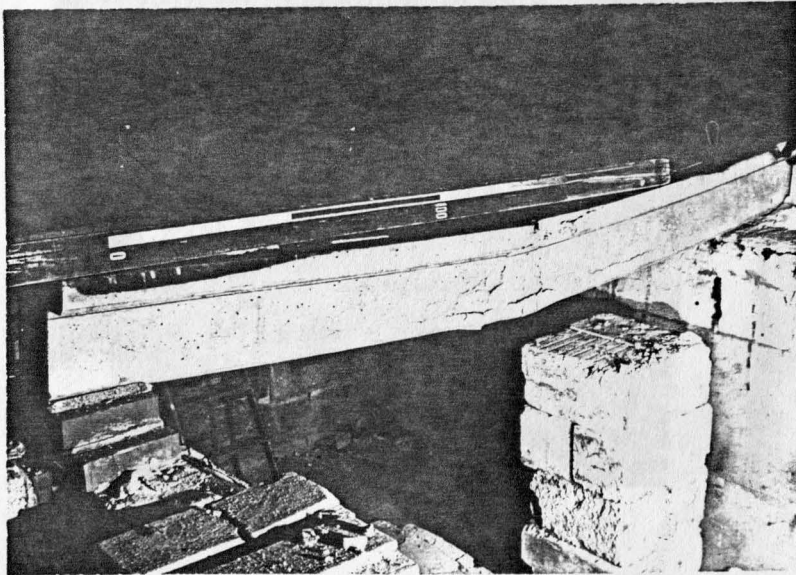


Bild 8: Balken 4 nach dem Wiedererkalten. Die Biegedruckzone versagte sekundär

#### 4.6.5 Versuchskörper 5 (Einfeldbalken, Bild 9)

- 37. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;
- 63. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;
- 75. Versuchsminute: Schrägrisse im Auflagerbereich;
- 81. Versuchsminute: Versuchsminute; Versagen im Mittelbereich.

Die beobachteten Schrägrisse führten nicht zum Versagen, dieses wurde vielmehr durch den Beginn des Fließens der Biegezugbewehrung bei  $565^{\circ}\text{C}$  Stahltemperatur eingeleitet.

Die Bügel wurden über  $590^{\circ}\text{C}$  erwärmt, ohne daß Fließerscheinungen beobachtet wurden.

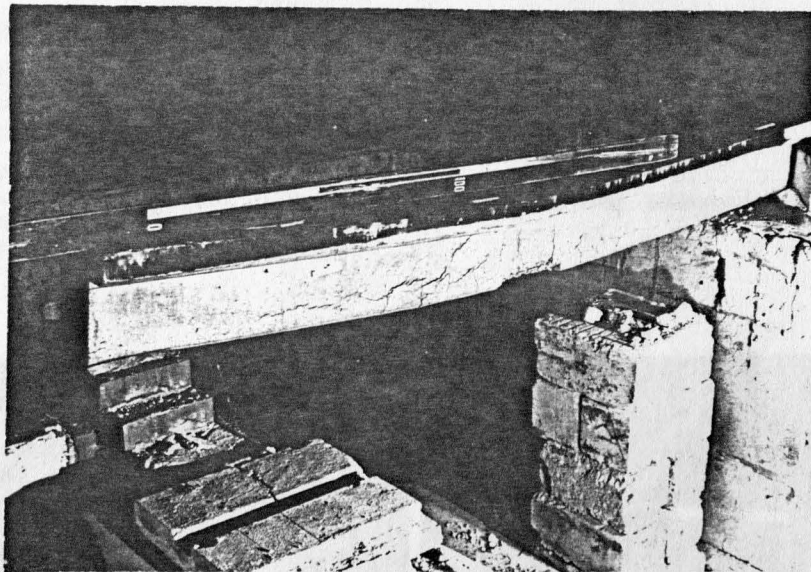


Bild 9: Balken 5 nach dem Wiedererkalten. Die Betonbrocken im unteren Bereich fielen während des Bruchvorgangs heraus



#### 4.6.6 Versuchskörper 6 (Einfeldbalken)

- 30. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;
- 85. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;
- 105. Versuchsminute: seitliche Betondeckung am unteren Rand fällt streckenweise ab, dort Montagestab freigelegt;
- 106. Versuchsminute: Schrägrisse im Auflagerbereich;
- 109. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Mittelbereich.

Die beobachteten Schrägrisse führten nicht zum Versagen, dieses wurde vielmehr durch den Beginn des Fließens der Biegezugbewehrung bei einer mittleren Stahltemperatur von  $670^{\circ}\text{C}$  eingeleitet.

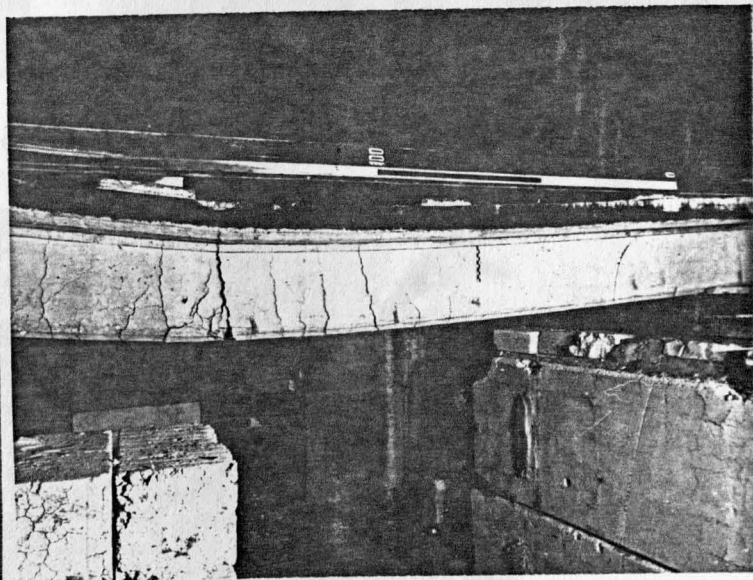
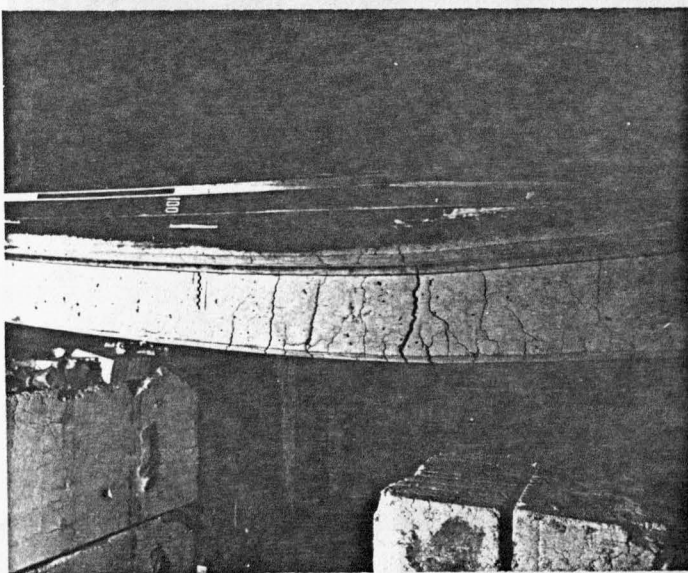
Die Bügel wurden über  $695^{\circ}\text{C}$  erwärmt, ohne daß Fließerscheinungen beobachtet wurden.

Der Balken wurde nur mit der Hälfte der Bemessungslast beansprucht.

#### 4.6.7 Versuchskörper 7 (Einfeldbalken, Bilder 10 und 11)

- 23. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;
- 28. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;
- 33. Versuchsminute: Risse weiten sich;
- 34. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Mittelbereich.

Das Versagen wurde durch den Beginn des Fließens der Biegezugbewehrung bei  $580^{\circ}\text{C}$  Stahltemperatur eingeleitet.

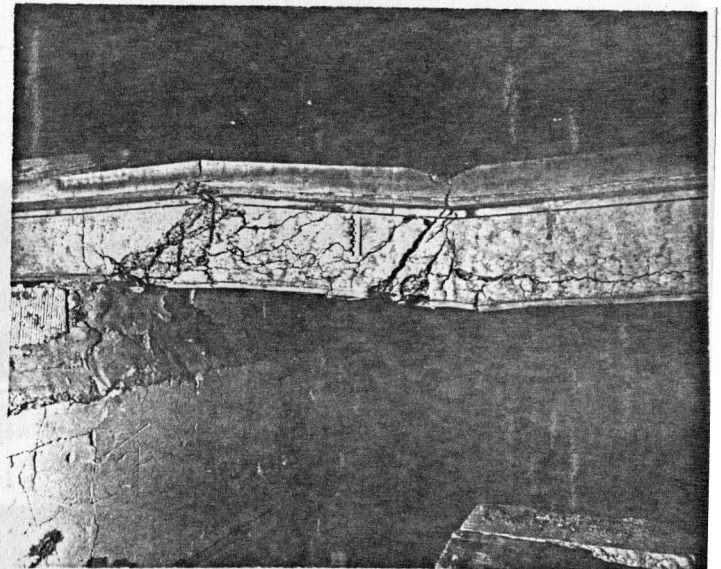
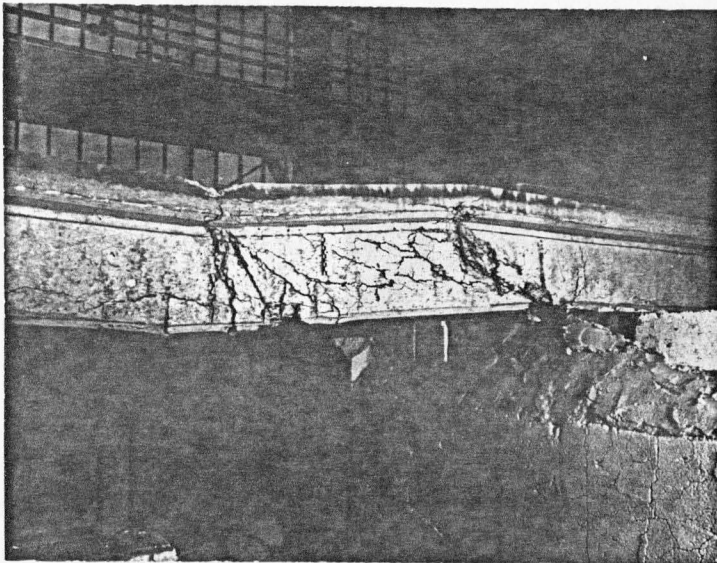


Bilder 10 und 11: Balken 7 nach dem Wiedererkalten

#### 4.6.8 Versuchskörper 8 (Zweifeldbalken, Bilder 12 - 14)

- 21. Versuchsminute: im Bereich der Mittelstütze auf der Balkenoberseite gleichmäßige Rißbildung im Bügelabstand;
- 32. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;
- 62. Versuchsminute: Schrägrisse zwischen Lastpunkt und Mittelaufleger;
- 75. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;
- 80. Versuchsminute: Schrägrisse weiten sich deutlich;
- 85. Versuchsminute: Versuchsende, Versagen im Bereich der Mittelstütze.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch der Bügel bei 572 °C mittlerer Stahltemperatur an den vertikalen Schenkeln.



Bilder 12 und 13: Balken 8 nach dem Wiedererkalten. Die äußere Betonschale fiel während des Bruchvorgangs herunter

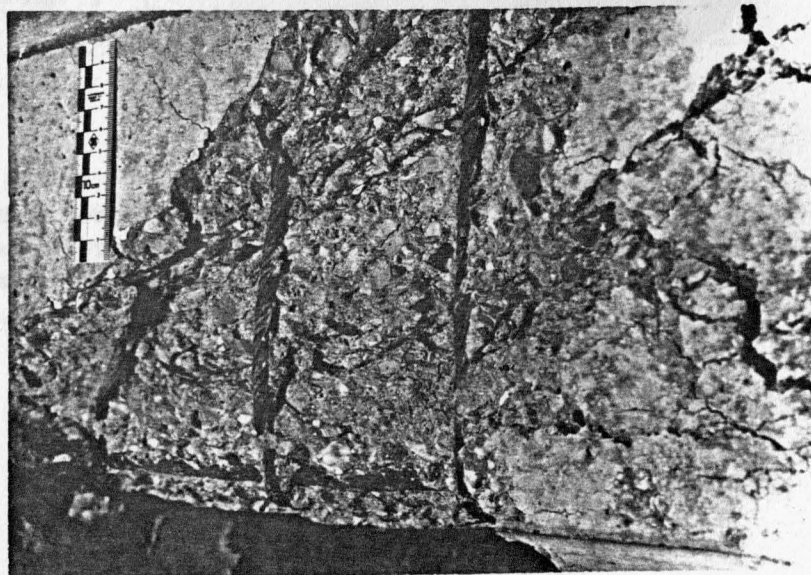


Bild 14: gerissene Bügel und Betonbruch in Richtung der Haupt-Druckspannungstrajektorien im Mittelauflegerbereich des Balkens 8



#### 4.6.9 Versuchskörper 9 (Zweifeldbalken, Bild 15)

- 27. Versuchsminute: im Bereich der Mittelstütze auf der Balkenoberseite gleichmäßige Reißbildung im Bügelabstand;
- 36. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;
- 74. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;
- 76. Versuchsminute: im Mittelauflegerbereich stärkere waagerechte Risse in der Biegedruckzone;
- 85. Versuchsminute: sehr flache Schrägrisse im Mittelauflegerbereich;
- 96. Versuchsminute: Schrägrisse weiten sich deutlich;
- 104. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Bereich der Mittelstütze.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien bei  $\sim 690^{\circ}\text{C}$  mittlerer Stahltemperatur der vertikalen Bügelschenkel.

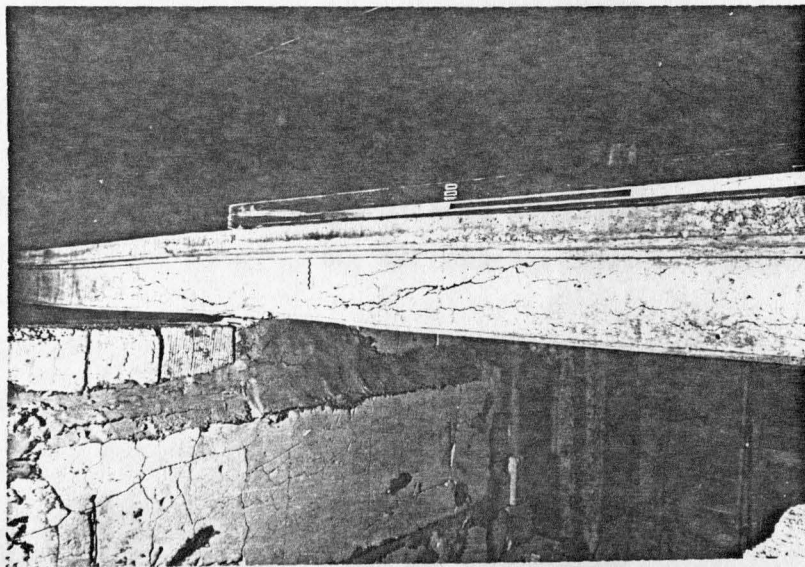


Bild 15: Balken 9 nach dem Wiedererkalten. Der Versuch wurde in einem etwas früheren Stadium als Balken 8 abgebrochen (vgl. Anlage 6.9); die Verformung ging nach Entlastung und Erkalten weitgehend zurück

#### 4.6.10 Versuchskörper 10 (Einfeldbalken)

- 46. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;
- 50. Versuchsminute: senkrechter Riß im unteren Stegbereich am Ende eines Längsstabes (nicht mit Sicherheit auszumachen);
- 62. Versuchsminute: Schrägrisse im Auflagerbereich;
- 71. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich;
- 82. Versuchsminute: Versuch abgebrochen, da die Brandraumabdeckung sich extrem verformt.

Der Versuchskörper hätte mit großer Sicherheit eine Feuerwiderstandsdauer von mehr als 90 min erreicht. Auf die Versagensart kann aus dem Verhalten des Balkens nicht geschlossen werden.

#### 4.6.11 Versuchskörper 11 (Zweifeldbalken, Bilder 16 und 17)

- 25. Versuchsminute: im Bereich der Mittelstütze auf der Balkenoberseite gleichmäßige Rißbildung im Bügelabstand;
- 49. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg;
- 63. Versuchsminute: Schrägrisse zwischen Lastpunkt und Mittelaufleger;
- 86. Versuchsminute: Schrägrisse weiten sich;
- 108. Versuchsminute: Enden der Schrägrisse auch auf der Balkenoberseite deutlich;
- 110. Versuchsminute: senkrechter Riß im unteren Stegbereich etwa in Feldmitte;
- 114. Versuchsminute: rapide Erweiterung der Schrägrisse, Versuchsende.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch der Bügel bei 635 °C mittlerer Stahltemperatur an den vertikalen Schenkeln

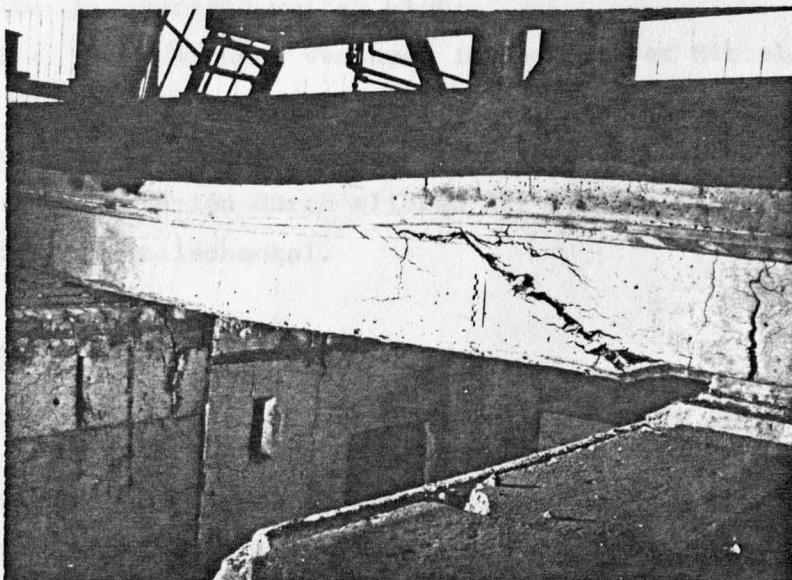


Bild 16: Balken 11 nach dem Wiedererkalten. Der klaffende Riß über dem Mittelaufleger entstand erst beim Erkalten

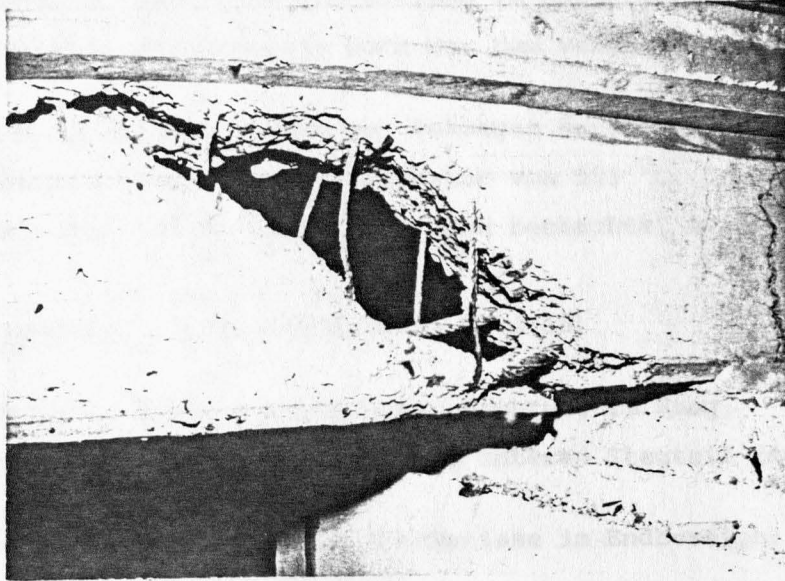


Bild 17: freigelegte Schubbruchstelle des Balkens 11 mit gerissenen Bügeln und stark verformter Längsbewehrung

#### 4.6.12 Versuchskörper 12 (Zweifeldbalken)

- 25. Versuchsminute: im Bereich der Mittelstütze auf der Balkenoberseite gleichmäßige Rißbildung im Bügelabstand;
- 51. Versuchsminute: waagerechte Risse im Steg zwischen Lastpunkt und Mittelaufleger;
- 66. Versuchsminute: senkrechte Risse im unteren Stegbereich in der Gegend der Lasteintragung; Schrägrisse zwischen Lastpunkt und Mittelaufleger;
- 89. Versuchsminute: Schrägrisse weiten sich;
- 102. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Bereich der Mittelstütze.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Fließen der Bügel bei 565 °C mittlerer Stahltemperatur der Vertikalschenkel.

#### 4.6.13 Versuchskörper 13 (Einfeldbalken)

- 53. Versuchsminute: Risse verschiedener Richtung im unteren Balkenteil im Bereich zwischen den Einzellasten;
- 70. Versuchsminute: Schrägrisse im Auflagerbereich;
- 71. Versuchsminute: Deutlichere Ausbildung der senkrechten Risse (Biegezugrisse) im Mittelbereich.
- 87. Versuchsminute: Deutlichere Ausbildung der Schrägrisse, Weite jedoch wesentlich kleiner als bei den Biegezugrissen.



- 92. Versuchsminute: Erweiterung der Biegezugrisse;
- 100. Versuchsminute: Deutliche Schrägrisse im Lasteintragungsbereich;
- 106. Versuchsminute: Versuchsende kurz vor dem Versagen.

Der Versuchskörper stand kurz vor dem Versagen durch Fließen der Biegezugbewehrung bei einer mittleren Stahltemperatur von  $555^{\circ}\text{C}$ . Die Bügel wurden über  $520^{\circ}\text{C}$  erwärmt, ohne daß Fließerscheinungen beobachtet wurden.

#### 4.6.14 Versuchskörper 14 (Einfeldbalken, Bild 18)

- 55. Versuchsminute: Risse verschiedener Richtung im Steg;
- 64. Versuchsminute: Waagerechte Risse im unteren Stegteil im mittleren Balkenbereich.
- 82. Versuchsminute: Flachgeneigte Schrägrisse im Endbereich; Biegezugrisse im Mittelbereich.
- 98. Versuchsminute: Biegezugrisse weiter als Schubrisse.
- 102. Versuchsminute: Biegezugrisse weiten sich.
- 108. Versuchsminute: Biegezug- und Schubrisse etwa gleich weit.
- 112. Versuchsminute: Versuchsende; Lastabfall.

Bei Versuchsabbruch waren noch keine Fließerscheinungen an der Biegezugbewehrung, die im Mittel auf  $525^{\circ}\text{C}$  erwärmt war, wie auch an den Bügeln, deren mittlere Temperatur über  $600^{\circ}\text{C}$  betrug, festzustellen. Es zeigte sich die Tendenz zum Biegezugversagen.

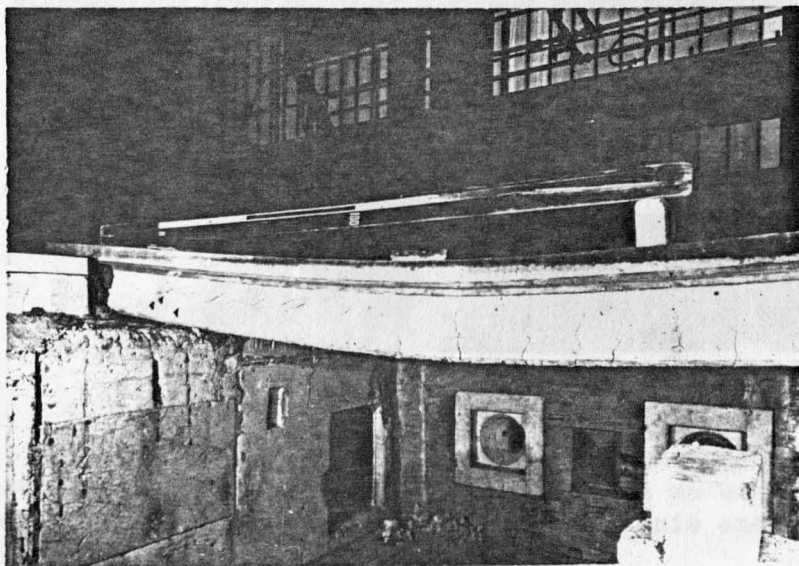


Bild 18: Balken 14 nach dem Wiedererkalten. Die Pfeile bezeichnen die Enden der gestaffelten Biegezugbewehrung

#### 4.6.15 Versuchskörper 15 (Einfeldbalken ohne Verbügelung, Bilder 19 und 20)

- 2. Versuchsminute: Unter Gebrauchslasteinwirkung sind keine sichtbaren Risse entstanden;
- 35. Versuchsminute: Abblätterungen an den Steg-Seitenflächen;
- 46. Versuchsminute: Querrisse auf der Balkenoberseite, besonders in den Endbereichen, werden durch Feuchtigkeitsaustritt sichtbar;
- 58. Versuchsminute: Risse verschiedener Richtung an den Stegseitenflächen;
- 59. Versuchsminute: Schrägrisse im Auflagerbereich;
- 75. Versuchsminute: Biegezugrisse im mittleren Balkenbereich, deren Weite jedoch kleiner ist als bei den Schubrisen;
- 76. Versuchsminute: Waagerechte Risse unter den mittleren Lasteintragungspunkten;
- 82. Versuchsminute: Schrägrisse etwa 3 - 4 mm weit;
- 95. Versuchsminute: Schrägrisse etwa 8 - 10 mm weit;
- 96. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Endbereich.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch des Steges und Druckflansches. Die Temperatur der Biegezugbewehrung betrug im Mittel 500 °C.

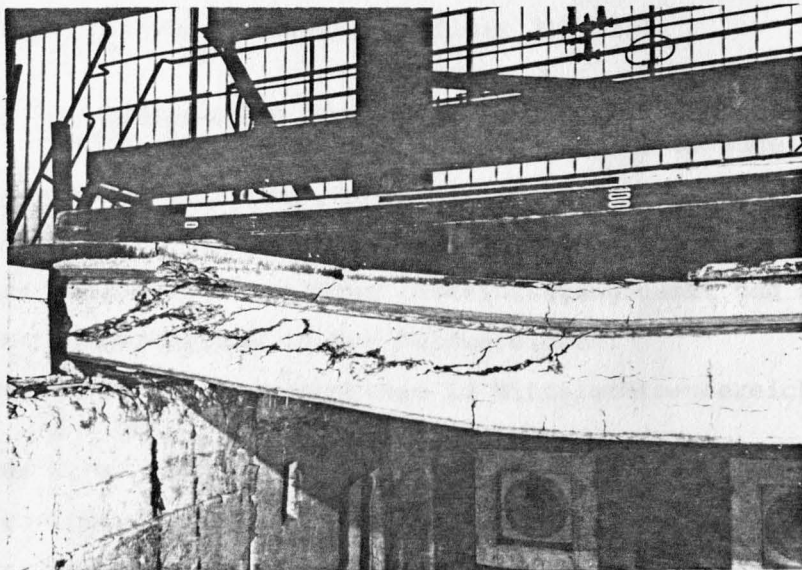


Bild 19: Balken 15 nach dem Wiedererkalten. In Höhe der obersten (dritten) Lage der Biegezugbewehrung haben sich die Schrägrisse zu einer waagerecht verlaufenden Zerstörung vereinigt. Diese Bruchlinie entstand erst im Augenblick des Versagens

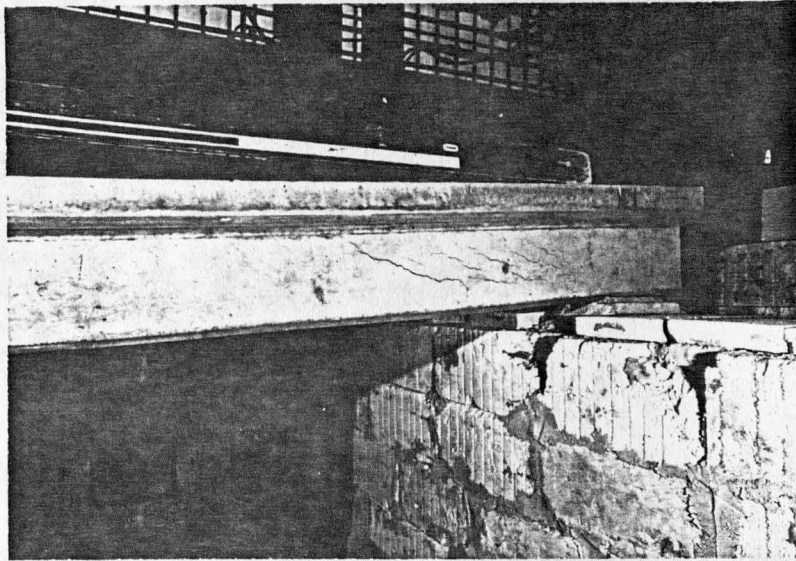


Bild 20: Balken 15 - Gegenseite - nach dem Wiedererkalten. Hier ist noch kein Ansatz einer waagerechten Bruchlinie zu erkennen. Keine Besonderheiten an den Enden der gestaffelten Biegezugbewehrung

#### 4.6.16 Versuchskörper 16 (Zweifeldbalken, Bilder 21 - 23)

- 9. Versuchsminute: Im Bereich der Mittelstütze auf der Balkenoberseite gleichmäßige Querrißbildung (Biegezugrisse) im Bügelabstand;
- 39. Versuchsminute: Risse nur mäßig erweitert;
- 45. Versuchsminute: Waagerechte Risse im unteren Balkenteil;
- 60. Versuchsminute: Schrägrisse zwischen Lasteintragungspunkt und Mittelstütze;
- 66. Versuchsminute: Biegezugrisse in den Feldbereichen;
- 76. Versuchsminute: Weite der Biegezugrisse im Mittelstützenbereich (Oberseite)  
 $\leq 1 \text{ mm}$ ;
- 80. Versuchsminute: Schrägrisse  $\sim 2 \text{ mm}$  weit;
- 87. Versuchsminute: Schnelle Erweiterung der Schrägrisse;
- 89. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Bereich der Mittelstütze.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch des Steges und der Biegedruckzone ohne Bruch der Bügel bei  $555^{\circ}\text{C}$  mittlerer Stahltemperatur (Vertikalschenkel).



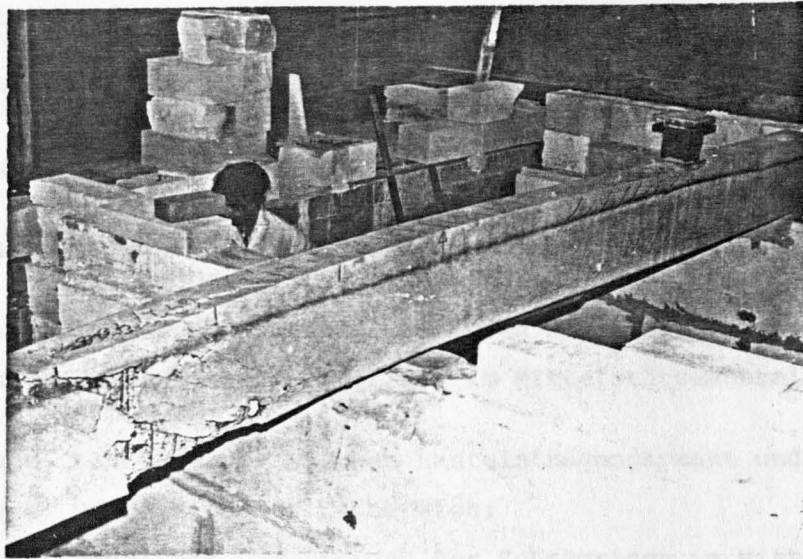
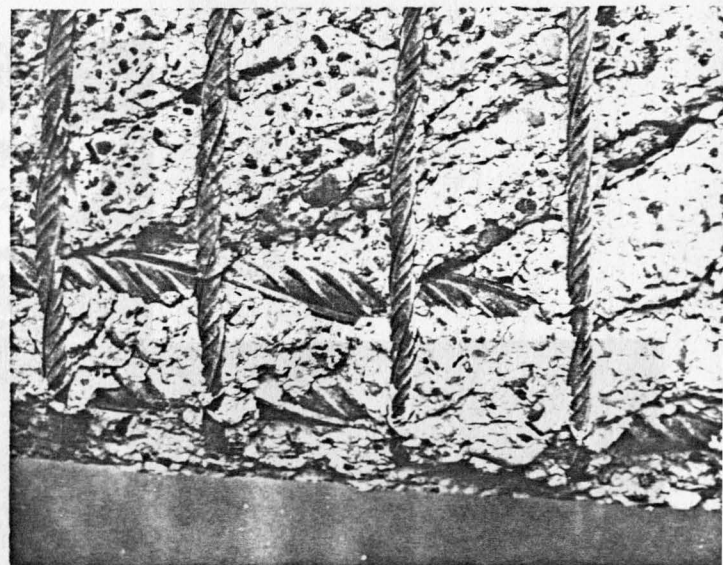
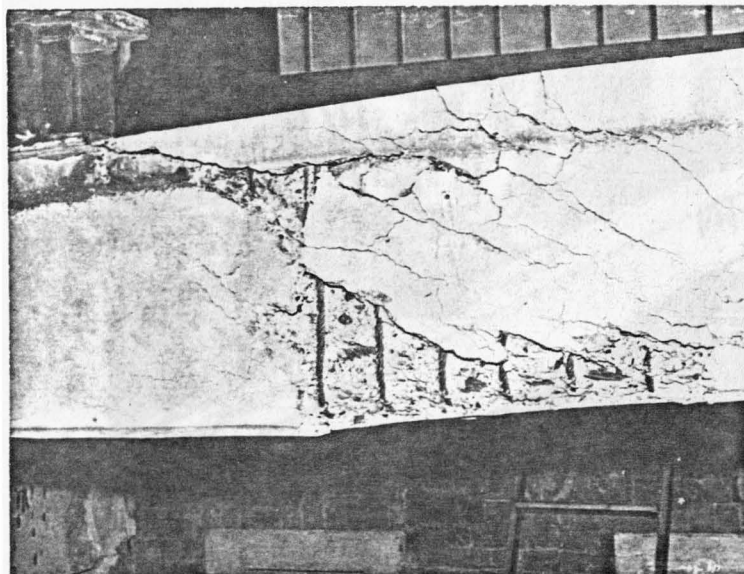


Bild 21: Balken 16 nach dem Wiedererkalten. Die Betonschale außerhalb der Bügel fiel während des Bruchvorgangs herab

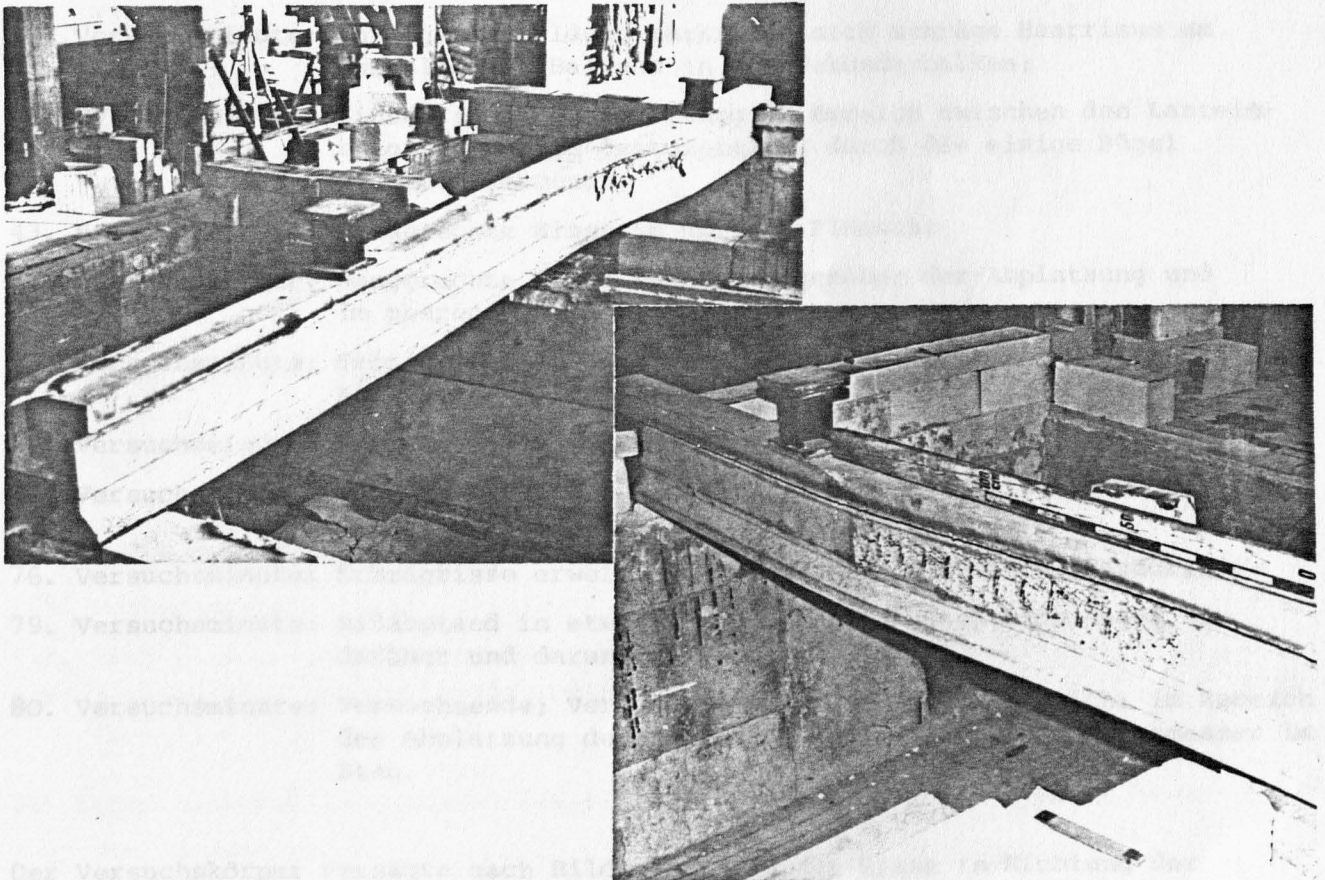


Bilder 22 und 23: Schubbruchbereich des Balkens 16. Die Betondruckstreben sind - auch nach dem Abschlagen der Außenschale - gut zu erkennen

4.6.17 Versuchskörper 17 (Zweifeldbalken, Bilder 24 - 26)

9. Versuchsminute: Infolge Rußbildung markieren sich schräge Haarrisse im Mittelstützenbereich;
20. Versuchsminute: Im Bereich der Mittelstütze auf der Balkenoberseite gleichmäßige Querrißbildung (Biegezugrisse) im Bügelabstand;
37. Versuchsminute: Geringfügige Stegabplatzung festgestellt, die aber vermutlich schon länger vorhanden ist;
45. Versuchsminute: Waagerechte Risse im unteren Flansch;
47. Versuchsminute: Weite der Biegezugrisse im Mittelstützenbereich (Oberseite)  $\leq 0,8$  mm;
58. Versuchsminute: Schrägrisse zwischen Lasteintragungspunkt und Mittelstütze;
63. Versuchsminute: Schrägrisse im Endbereich;
67. Versuchsminute: Deutliche Erweiterung der Schrägrisse im Mittelstützenbereich;
68. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Bereich der Mittelstütze.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch des Steges ohne Bruch der Bügel, die auf  $590^{\circ}\text{C}$  (i.M.) erwärmt wurden (Vertikalschenkel).



Bilder 24 und 25: Balken 17 nach dem Wiedererkalten. Die Außenschale des Steges fiel beim Bruch herunter





Bild 26: Schubdruckbruch des Steges, Balken 17, mit stark verformten Bügeln

4.6.18 Versuchskörper 18 (Einfeldbalken, indirekt gelagert, Bilder 27 - 29)

- 12. Versuchsminute: Leichte Eckabplatzungen;
- 17. Versuchsminute: Infolge Rußbildung markieren sich schräge Haarrisse am Anschluß des Balkens an den Sekundarbalken;
- 31. Versuchsminute: Einseitige Stegabplatzung im Bereich zwischen den Lasteintragungspunkten festgestellt, durch die einige Bügel sichtbar werden;
- 43. Versuchsminute: Waagerechte Risse im unteren Flansch;
- 51. Versuchsminute: Waagerechte Risse im Steg gegenüber der Abplatzung und im oberen Flansch;
- 63. Versuchsminute: Schrägrisse im Steg zwischen Lasteintragungspunkten und Auflagern;
- 65. Versuchsminute: Biegezugrisse im Bereich des Maximalmoments;
- 73. Versuchsminute: Schrägrisse  $\sim 1,5$  mm weit, nach beiden Seiten etwa gleichmäßig, noch auf den Steg beschränkt;
- 76. Versuchsminute: Schrägrisse erweitern sich stärker als die Biegezugrisse;
- 79. Versuchsminute: Rißabstand in etwa halber Steghöhe wesentlich enger als darüber und darunter;
- 80. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen im Lasteintragungsbereich; im Bereich der Abplatzung durchgehendes Loch von  $\sim 15$  cm Durchmesser im Steg.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch des Steges und Druckflansches ohne Bruch der Bügel, die auf i. M.  $670^{\circ}\text{C}$  erwärmt wurden (Vertikalschenkel).

#### 4.6.20 Versuchskörper 20 (Zweifeldbalken, Bilder 32 und 33)

- 17. Versuchsminute: Erste Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Mittelstützenbereich, Abstand durch Bügelabstand vorgegeben;
- 31. Versuchsminute: waagerechte Risse im unteren Stegbereich;
- 36. Versuchsminute: Schrägrisse im Lasteintragungsbereich beider Felder markieren sich durch Wasseraustritt;
- 46. Versuchsminute: Eckabplatzung in Nähe des Endauflagers Feld 2 festgestellt, jedoch schon länger vorhanden;
- 50. Versuchsminute: waagerechte Stegrisse werden deutlicher;
- 51. Versuchsminute: keine wesentliche Erweiterung der Biegezugrisse auf der Balkenoberseite;
- 84. Versuchsminute: Schrägrisse zwischen Lasteintragung und Mittelaufleger werden deutlicher in beiden Feldern;
- 93. Versuchsminute: Weite der Biegezugrisse im Mittelstützenbereich maximal  $\sim 1,0$  mm;
- 108. Versuchsminute: Weite dieser Risse maximal  $\sim 1,2$  mm;
- 113. Versuchsminute: Schrägrisse in den unteren Balkenbereichen etwas weiter als oben; maximal  $\sim 1,0$  mm;
- 118. Versuchsminute: Weite dieser Risse maximal  $\sim 1,5$  mm;
- 123. Versuchsminute: Weite dieser Risse maximal  $\sim 2,0$  mm;
- 128. Versuchsminute: Weite dieser Risse maximal  $\sim 2,3$  mm;
- 129. Versuchsminute: Bildung von Biegezugrissen in den Feldbereichen, Balkenunterseite;
- 133. Versuchsminute: Weite der Schrägrisse im unteren Balkenbereich maximal  $\sim 3,0$  mm;
- 135. Versuchsminute: Biegezugrisse auf der Balkenoberseite nicht deutlich erweitert;
- 138. Versuchsminute: Schrägrißerweiterung in Feld 2 etwas stärker als in Feld 1; Weite dieser Risse  $\sim 4,0$  mm;
- 143. Versuchsminute: Weite dieser Risse  $\sim 5,0$  mm;
- 148. Versuchsminute: Weite dieser Risse  $\sim 5,5$  mm;
- 153. Versuchsminute: Weite dieser Risse  $\sim 6,0$  mm;
- 158. Versuchsminute: Weite dieser Risse  $\sim 8,0$  mm;
- 163. Versuchsminute: Weite dieser Risse  $\sim 10,0$  mm;
- 168. Versuchsminute: Versuchsende; Versagen in Feld 1.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch des Steges mit nachfolgendem Bruch der Biegedruckzone ohne Bruch der Bügel, deren außenliegende Vertikalschenkel i. M. auf  $620^{\circ}\text{C}$  und innenliegende Vertikalschenkel i. M. auf  $250^{\circ}\text{C}$  erwärmt wurden.

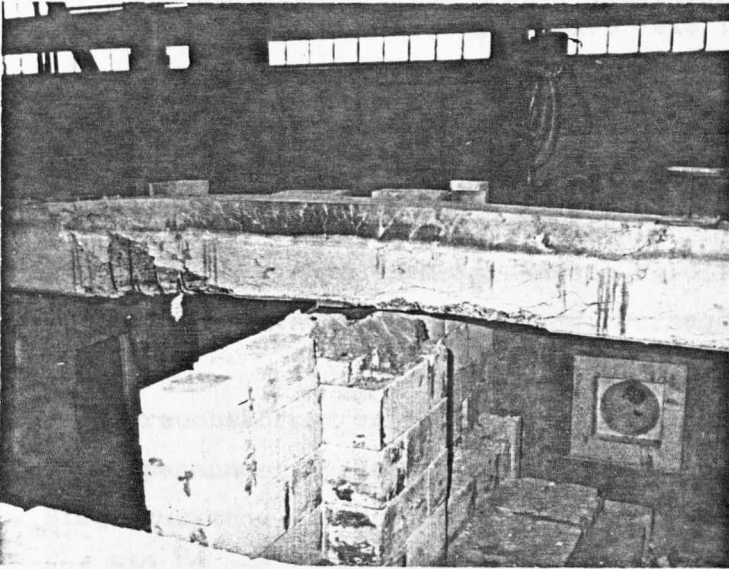


Bild 32: Balken 20 nach dem Wiedererkalten. Die Betonschale außerhalb der Bügel fiel während des Bruchvorgangs herunter

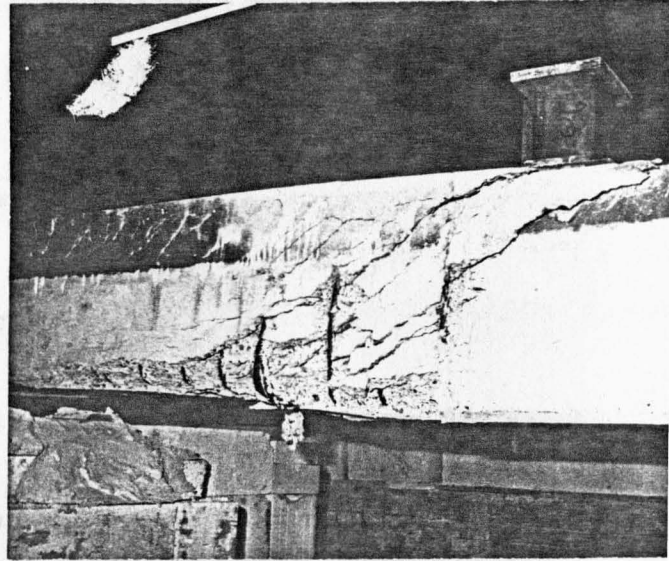


Bild 33: Schubbruch im Mittelauf-lagerbereich, Balken 20

#### 4.6.21 Versuchskörper 21 (Zweifeldbalken, Bilder 34 und 35)

- 30. Versuchsminute: waagerechte Risse im unteren Stegbereich in Nähe des Mittelauf-lagers;
- 33. Versuchsminute: genannte Risse erweitern sich in Feld 1;
- 38. Versuchsminute: genannte Risse erweitern sich in Feld 1 noch stärker;
- 44. Versuchsminute: waagerechte Risse auch in Feld 2 erweitert;
- 48. Versuchsminute: untere Balkenkante in Feld 1 abgefallen, Bügel sind sichtbar, jedoch keine tiefergehenden Zerstörungen;
- 58. Versuchsminute: normales Bild der Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Bereich der Mittelstütze;
- 72. Versuchsminute: Bildung von Biegezugrissen unten Feld 1;
- 86. Versuchsminute: Beginn von Schrägrissen Feld 1, i. a. flachgeneigt, jedoch im Lasteintragungsbereich steiler;
- 88. Versuchsminute: gleiche Erscheinung in Feld 2;
- 90. Versuchsminute: ein Biegezugriß auf der Balkenoberseite ca. 200 mm vom Mittelauf-lager entfernt, etwas mehr erweitert als die übrigen;
- 110. Versuchsminute: auf der Balkenoberseite keine deutlichen Veränderungen; Schrägrißweite maximal  $\sim 0,8$  mm;
- 119. Versuchsminute: Schrägrißweite maximal  $\sim 1,0$  mm;



126. Versuchsminute: Schrägrisse erweitern sich im Feld 1 schneller als in Feld 2;  
Schrägrißweite Feld 1 maximal  $\sim 1,5$  mm;
128. Versuchsminute: Schrägrißweite Feld 1 maximal  $\sim 2$  mm;
130. Versuchsminute: Schrägrißweite Feld 1 maximal  $\sim 3$  mm;
131. Versuchsminute: Schrägrißweite Feld 1 maximal  $\sim 5$  mm;
133. Versuchsminute: Schrägrißweite Feld 1 maximal  $\sim 8$  mm;
136. Versuchsminute: Schrägrißweite Feld 1 maximal  $\sim 12$  mm;
137. Versuchsminute: Versuchsende, Versagen in Feld 1.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch des Steges mit nachfolgendem Bruch der Biegedruckzone mit Bruch der Bügel, deren außenliegende Vertikalschenkel i. M. auf  $510^{\circ}\text{C}$  und innenliegende Vertikalschenkel i. M. auf  $189^{\circ}\text{C}$  erwärmt wurden. Während des Bruchvorganges wurden diejenigen Bügel, die im Bereich der Mittelstütze unten mit Winkelhaken geschlossen waren, aufgebogen.

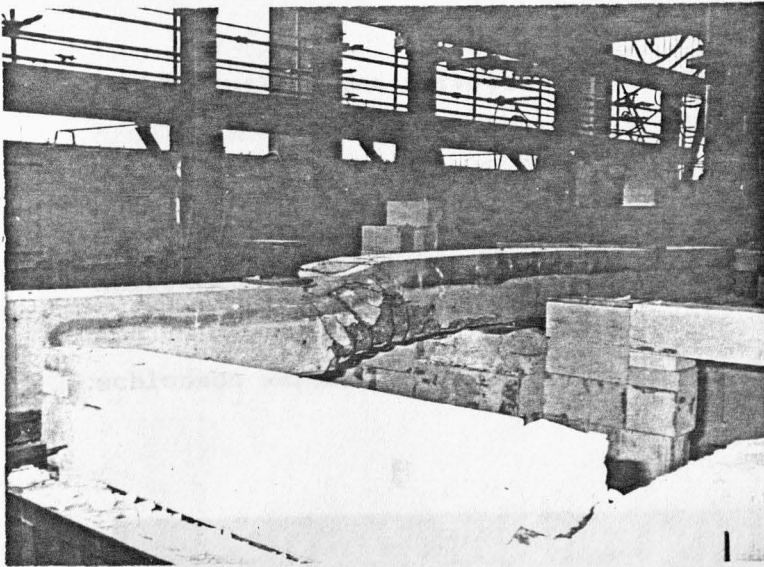


Bild 34:

Balken 21 nach dem Wiedererkalten.  
Die Betonschale außerhalb des Bügelkorbs  
fiel während des Bruchvorgangs herab

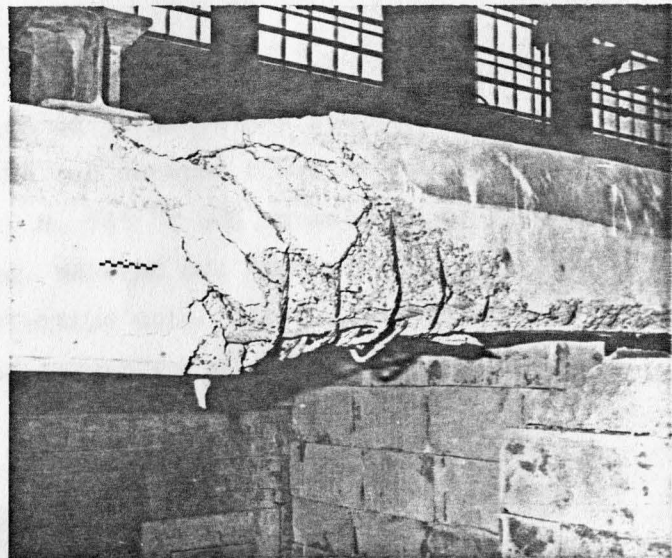


Bild 35:

Schubbruch des Balkens 21 im Mittelstützenbereich mit gebrochenen und aufgebogenen Bügeln

#### 4.6.22 Versuchskörper 22 (Zweifeldbalken, Bilder 36 - 39)

- 25. Versuchsminute: flächige Abplatzung, Durchmesser  $\sim 250$  mm, aus einer Stegseitenfläche über dem Mittelaufleger, ein Bügel ist sichtbar.
- 30. Versuchsminute: Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Mittelstützenbereich;
- 72. Versuchsminute: waagerechte Risse im unteren Stegbereich in der Nähe des Mittelauflegers Feld 1; noch keine Schrägrisse;
- 78. Versuchsminute: erste flachgeneigte Schrägrisse im unteren Balkenbereich Feld 2 zwischen Lasteintragungspunkt und Mittelaufleger;
- 88. Versuchsminute: waagerechte Risse auch im Feld 2;
- 112. Versuchsminute: flachgeneigte Schrägrisse auch in Feld 1;
- 123. Versuchsminute: langsame Rißerweiterung auf der Balkenoberseite;
- 137. Versuchsminute: Schrägrisse im Lasteinleitungsbereich des Feldes 1 markieren sich deutlicher;
- 147. Versuchsminute: gleiche Erscheinung in Feld 2;
- 150. Versuchsminute: Schrägrisse jeweils auf einer Seitenfläche deutlicher als auf der anderen (gegensymmetrisch); noch immer relativ kleine Rißweiten;
- 156. Versuchsminute: Versuchsende; nach rapider Rißerweiterung Versagen in Feld 2.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien relativ plötzlich durch Bruch des Steges mit nachfolgendem Bruch der Biegedruckzone und Bruch der unteren Ecken einiger Bügel, deren außenliegende Vertikalschenkel auf i. M.  $565^{\circ}\text{C}$  und innenliegende Vertikalschenkel auf i. M.  $265^{\circ}\text{C}$  erwärmt wurden. Während des Bruchvorganges wurden diejenigen Bügel, die im Bereich der Mittelstütze unten mit Winkelhaken geschlossen waren, aufgebogen. Eine Schrägaufbiegung wurde weitgehend gestreckt.

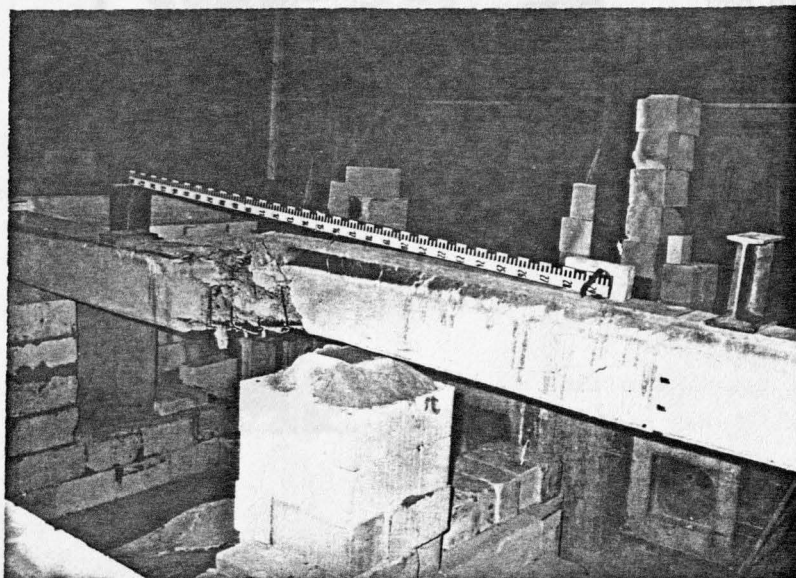
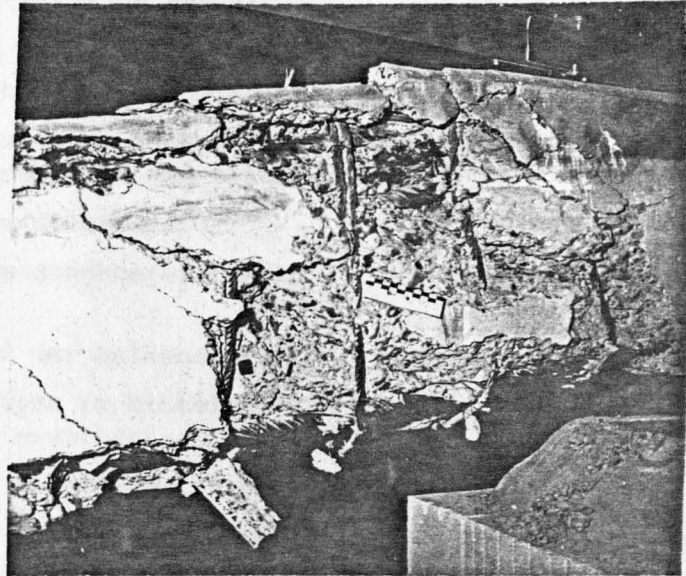
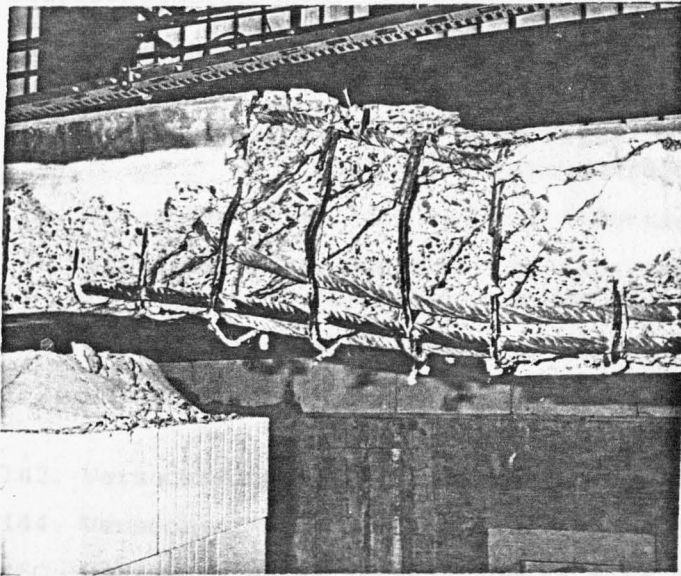


Bild 36:

Balken 22 nach dem Wiederkalten. Die äußere Betonschale fiel während des Bruchvorganges herab





Bilder 37 und 38: Schubbruch im Mittelstützenbereich, Balken 22



Bild 39:

Detail des Bildes 38 nach dem Herausschlagen des Betons, gut sichtbar die gerissenen Bügel und die stark verformten Schrägaufbiegungen

#### 4.6.23 Versuchskörper 23 (Zweifeldbalken, Bilder 40 und 41)

- 40. Versuchsminute: Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Mittelstützenbereich, Abstand durch Bügel vorgegeben;
- 58. Versuchsminute: waagerechte Risse im unteren Stegbereich beider Felder zwischen Lasteintragungspunkt und Mittelaufleger;
- 65. Versuchsminute: noch keine Schrägrisse sichtbar;
- 78. Versuchsminute: Schrägriß im Lasteintragungsbereich Feld 1, flachgeneigte Schrägrisse Feld 2;
- 90. Versuchsminute: gleichmäßige Risse auf der Balkenoberseite;
- 112. Versuchsminute: flachgeneigte Schrägrisse im Mittelauflegerbereich, besonders in Feld 2, etwas erweitert;
- 142. Versuchsminute: Schrägrißweite Feld 2 maximal  $\sim 1,5$  mm;
- 144. Versuchsminute: Schrägrißweite Feld 2 maximal  $\sim 2$  mm;
- 150. Versuchsminute: Schrägrißweite Feld 2 maximal  $\sim 4$  mm;
- 153. Versuchsminute: Schrägrißweite Feld 2 maximal  $\sim 6$  mm;
- 155. Versuchsminute: Versuchsende, Versagen in Feld 2.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptdruckspannungstrajektorien durch Bruch des Steges mit nachfolgendem Bruch der Biegedruckzone ohne Bruch der Bügel, deren außenliegende Vertikalschenkel auf i. M.  $710^{\circ}\text{C}$  und innenliegende Vertikalschenkel auf i.M.  $290^{\circ}\text{C}$  erwärmt wurden.

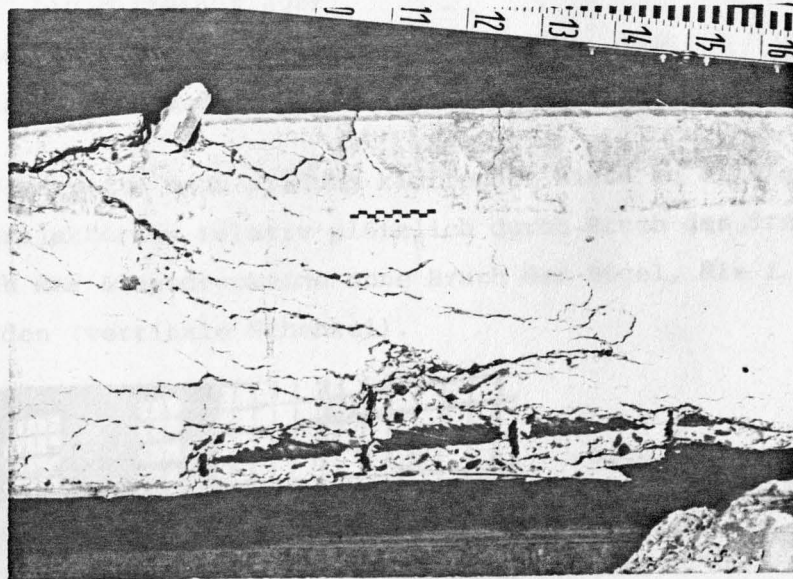


Bild 40: Schubbruch des Balkens 23 im Bereich des Mittelauflegers. Die Betonschale außerhalb der Bügel fiel während des Bruchvorgangs herab



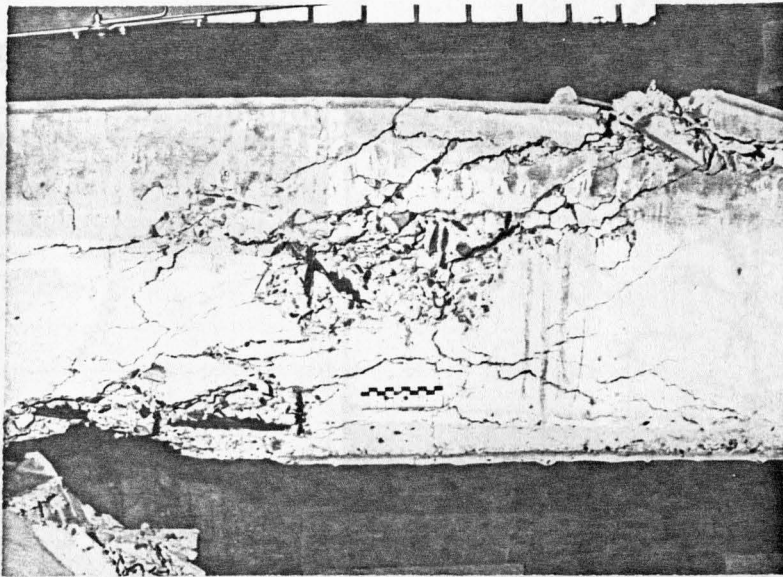


Bild 41: Schubbruch des Balkens 23 im Bereich des Mittelaufagers. Die Betonschale außerhalb der Bügel fiel während des Bruchvorgangs herab

#### 4.6.24 Versuchskörper 24 (Zweifeldbalken, Bilder 42 - 44)

30. Versuchsminute: durch Feuchteaustritt markieren sich zwei Schrägrisse in Feld 1 von den beiden dem Mittelaufleger nächstgelegenen Lasteintragungspunkten zum Mittelaufleger;
45. Versuchsminute: Biegezugrisse im Mittelauflegerbereich;
75. Versuchsminute: deutliche Schrägrisse in Feld 2, etwa von Feldmitte bis Mittelaufleger;
83. Versuchsminute: Diese Risse weiten sich rapide;
84. Versuchsminute: Versuchsende, Versagen in Feld 2.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptzugspannungstrajektorien relativ plötzlich durch Bruch des Steges mit nachfolgendem Bruch der Biegedruckzone ohne Bruch der Bügel, die i. M. auf  $520^{\circ}\text{C}$  erwärmt wurden (vertikale Schenkel).

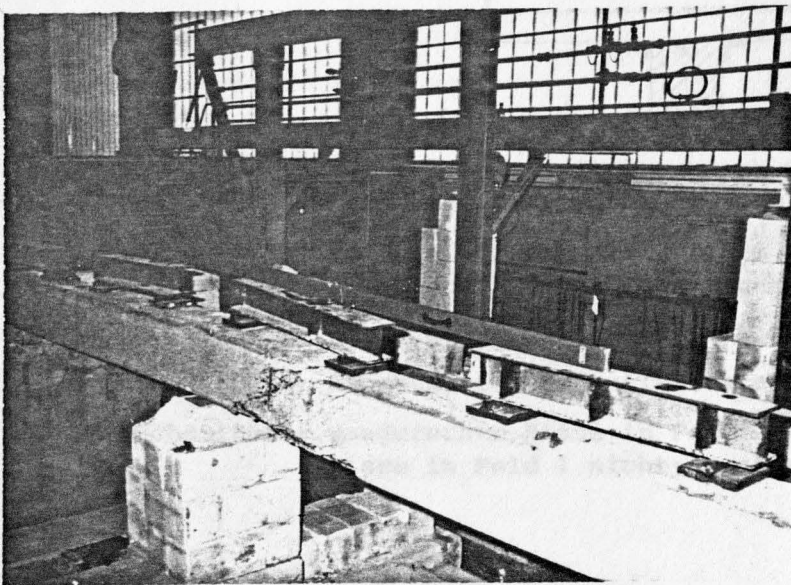
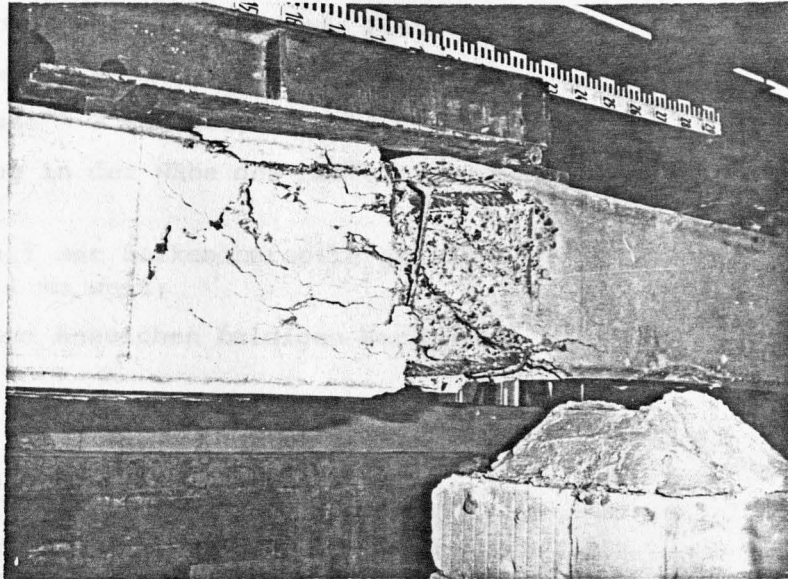
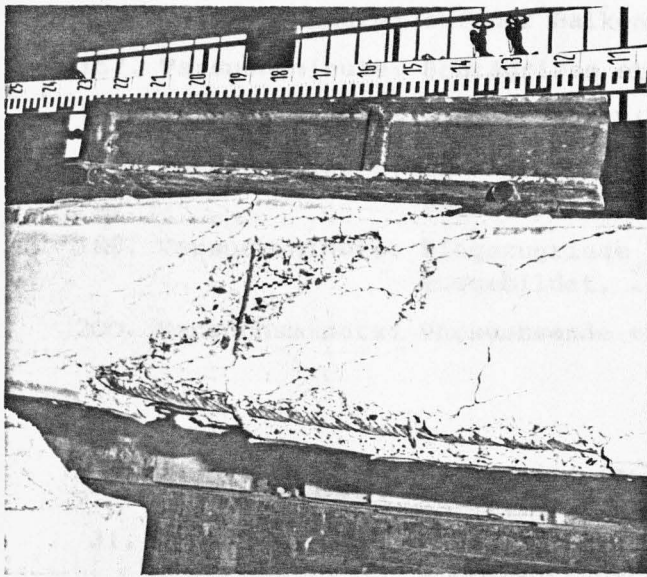


Bild 42:

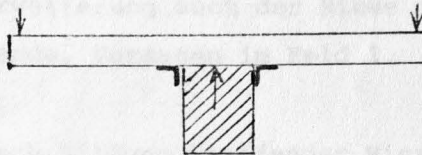
Balken 24 nach dem Wiederkalten. Die äußere Betonschale fiel im Augenblick des Bruchs herab



Bilder 43 und 44: Schubbruch im Mittelstützenbereich, Balken 24.  
Auf Bild 43 ein aufgebogener Winkelhaken

#### 4.6.25 Versuchskörper 25 (Zweifeldbalken)

- 8. Versuchsminute: Abplatzungen der unteren Balkenkanten;
- 15. Versuchsminute: weitere Eckabplatzungen, einige Bügel werden dadurch sichtbar;
- 32. Versuchsminute: Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Bereich des Mittelauftragers;
- 45. Versuchsminute: Balken hat sich etwa 20 mm von den Endauflagern abgehoben;
- 60. Versuchsminute: Rißbildung oberhalb der Abplatzungen ohne besondere Richtungstendenz;
- 66. Versuchsminute: Endabhebung etwa 30 mm;
- 80. Versuchsminute: Endabhebung etwa 40 mm;
- 93. Versuchsminute: Endabhebung auf einer Seite behindert durch den zur Kippaussteifung angeordneten Endquerträger;



auf der Gegenseite, wo noch Spielraum vorhanden ist, beträgt die Abhebung etwa 50 mm;

- 102. Versuchsminute: leichte Schrägrißbildung im unteren Stegbereich Feld 1 zwischen Lasteintragungspunkt und Mittelauftrager;
- 106. Versuchsminute: waagerechte Risse oberhalb der Abplatzungen im Feld 2;
- 120. Versuchsminute: Abhebung des Endauflagers unverändert;
- 145. Versuchsminute: waagerechte Risse in Feld 2 maximal  $\sim 2$  mm weit, Schrägrisse in Feld 1 nicht erweitert;

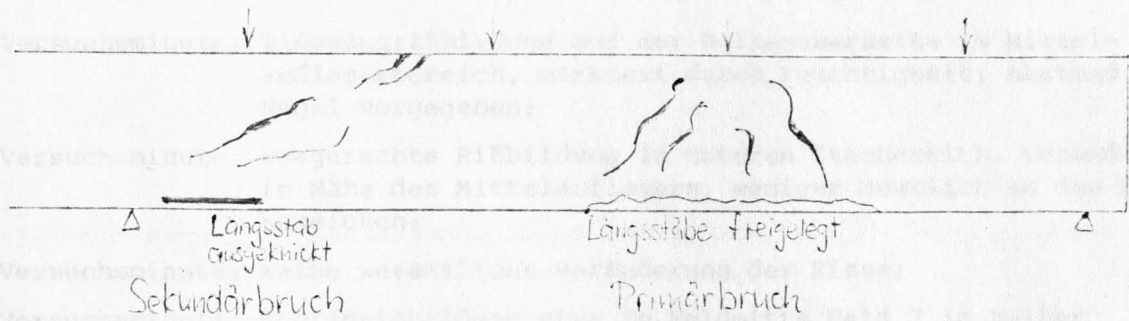
- 152. Versuchsminute: auf der Balkenoberseite noch geringe Feuchtigkeit;
- 157. Versuchsminute: Schrägrisse etwas erweitert;
- 162. Versuchsminute: waagerechte Risse  $\sim 3$  mm weit;
- 185. Versuchsminute: Schrägrißbildung in der Nähe des Lasteintragungs-  
punktes Feld 1;
- 188. Versuchsminute: Biegezugrisse auf der Balkenoberseite gleichmäßig  
ausgebildet,  $\sim 1$  mm weit;
- 200. Versuchsminute: Versuchsende ohne Anzeichen baldigen Versagens.

#### 4.6.26 Versuchskörper 26 (Zweifeldbalken, Bilder 45 - 48)

- 31. Versuchsminute: Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Bereich des  
Mittelauftragers, Abstand durch Bügel vorgegeben;
- 58. Versuchsminute: waagerechte Risse im unteren Stegbereich Feldmitte  
Felder 1 und 2;
- 65. Versuchsminute: Kantenabplatzung im Mittelauftragerbereich Feld 2 fest-  
gestellt, jedoch schon länger vorhanden;
- 118. Versuchsminute: im Mittelauftragerbereich an den Balkenseitenflächen Be-  
ginn einer Rißbildung noch unbestimmter Richtungstendenz;
- 135. Versuchsminute: steile Risse im Bereich des zweiten Lasteintragungspunktes  
(gezählt von den Endauflagern);
- 150. Versuchsminute: Schrägrißbildung zwischen drittem Lasteintragungspunkt  
(gezählt von den Endauflagern) und Mittelauftrager;
- 170. Versuchsminute: Rißweiten auf der Balkenoberseite nicht wesentlich ver-  
größert;
- 180. Versuchsminute: Rißweiten Feld 1 etwas größer als in Feld 2;
- 203. Versuchsminute: Rißweiten im Lasteintragungsbereich Feld 1 maximal  $\sim 2$  mm;
- 207. Versuchsminute: Rißweite im Lasteintragungsbereich Feld 1 max.  $\sim 3$  mm;
- 208. Versuchsminute: Rißweite im Lasteintragungsbereich Feld 1 max.  $\sim 5$  mm;
- 210. Versuchsminute: Rißweite im Lasteintragungsbereich Feld 1 max.  $\sim 7$  mm;
- 213. Versuchsminute: Rißweite im Lasteintragungsbereich Feld 1 max.  $\sim 8$  mm;
- 216. Versuchsminute: rapide Erweiterung auch der Risse im Mittelauftragerbereich;
- 222. Versuchsminute: Versuchsende, Versagen im Feld 1.

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse, die den Steg zunächst im Feldbereich, danach im Mittelauftragerbereich zerstörten, worauf auch die Biegedruckzone brach. Da die Fotos kein deutliches Bild vermitteln, wird der Versagenszustand in der Skizze dargestellt.





Die Bügeltemperatur betrug beim Bruch des Balkens i. M.  $820^{\circ}\text{C}$  an den äußeren und i. M.  $380^{\circ}\text{C}$  an den inneren Vertikalschenkeln.

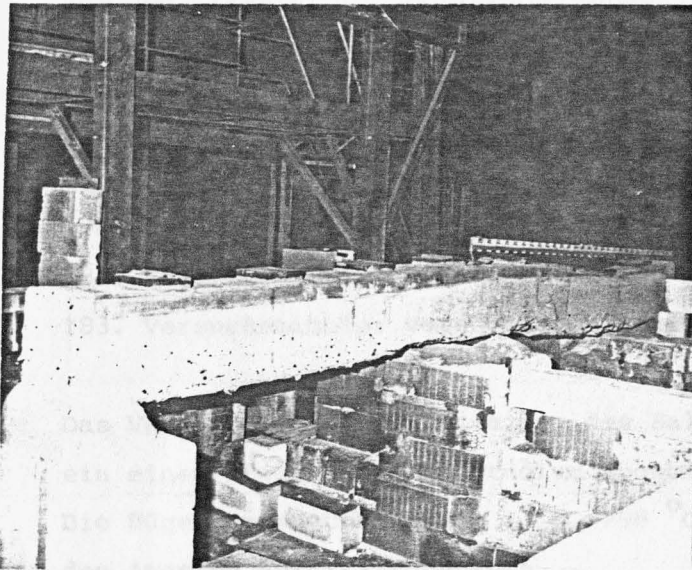


Bild 45:  
Balken 26 nach dem Wiedererkalten.  
An der Betonoberfläche bläht während des Versuchs bei rd.  $1000^{\circ}\text{C}$   
Zuschlagkörner auf

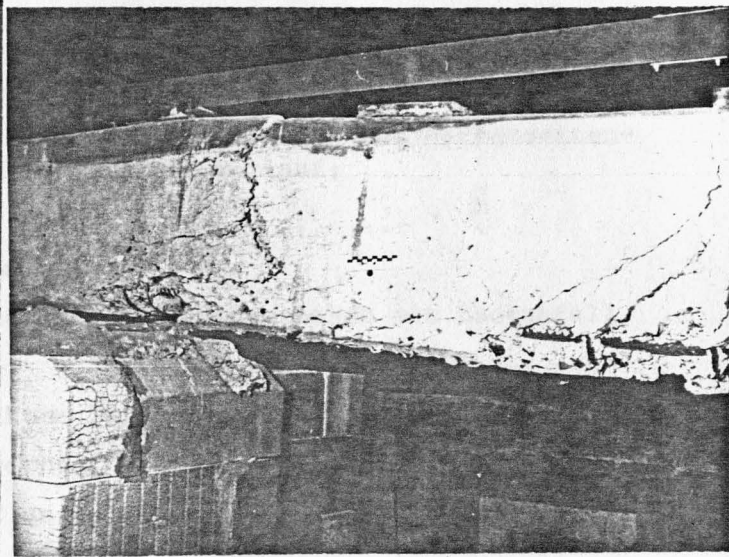
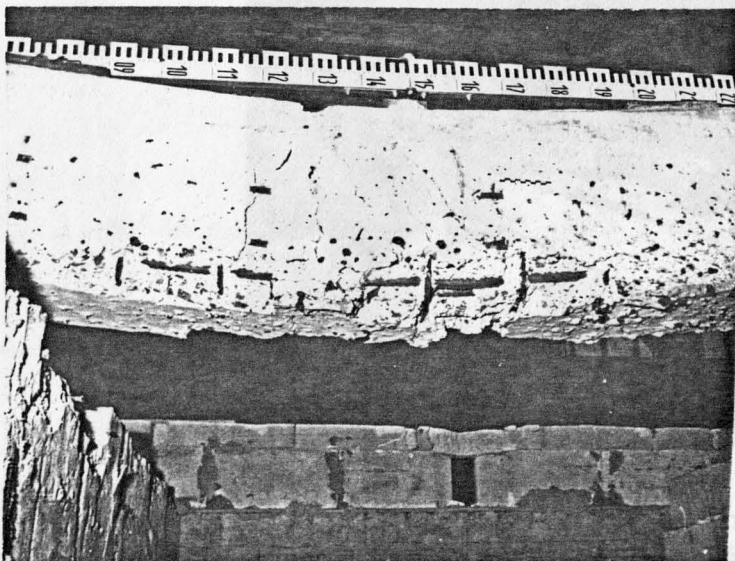


Bild 46:  
Sekundärbruch im Mittelstützenbereich,  
Balken 26



Bilder 47 und 48:  
Primärbruch im Feldbereich,  
Balken 26





4.6.27 Versuchskörper 27 (Zweifeldbalken, Bild 49)

35. Versuchsminute: Biegezugrißbildung auf der Balkenoberseite im Mittelauflagerbereich, markiert durch Feuchtigkeit, Abstand durch Bügel vorgegeben;
70. Versuchsminute: waagerechte Rißbildung im unteren Stegbereich, besonders in Nähe des Mittelaufagers, weniger deutlich in den Feldbereichen;
103. Versuchsminute: keine wesentliche Veränderung der Risse;
109. Versuchsminute: Schrägrißbildung etwa in Feldmitte Feld 2 in halber Balkenhöhe;
112. Versuchsminute: Rißbildung etwa in Feldmitte Feld 1 ohne erkennbare Richtungstendenz;
127. Versuchsminute: waagerechte Risse im Mittelauflagerbereich deutlich erweitert;
151. Versuchsminute: waagerechte Risse wandern als Schrägrisse nach oben; Biegezugriß Feldmitte Feld 1;
165. Versuchsminute: Rißbildung Feld 1 im Bereich max. M auf den Balkenseitenflächen, annähernd senkrechter Verlauf;
178. Versuchsminute: Erweiterung dieser Risse;
182. Versuchsminute: Rißweite  $\sim 6 - 8$  mm;
183. Versuchsminute: Versuchsende; rapide Durchbiegunszunahme mit Lastabfall.

Das Versagen entsprach etwa dem des Balkens 26, jedoch wurde dieser Versuch ein einem etwas früheren Stadium abgebrochen.

Die Bügeltemperatur betrug i. M.  $798^{\circ}\text{C}$  an den äußeren und i. M.  $320^{\circ}\text{C}$  an den inneren Vertikalschenkeln.

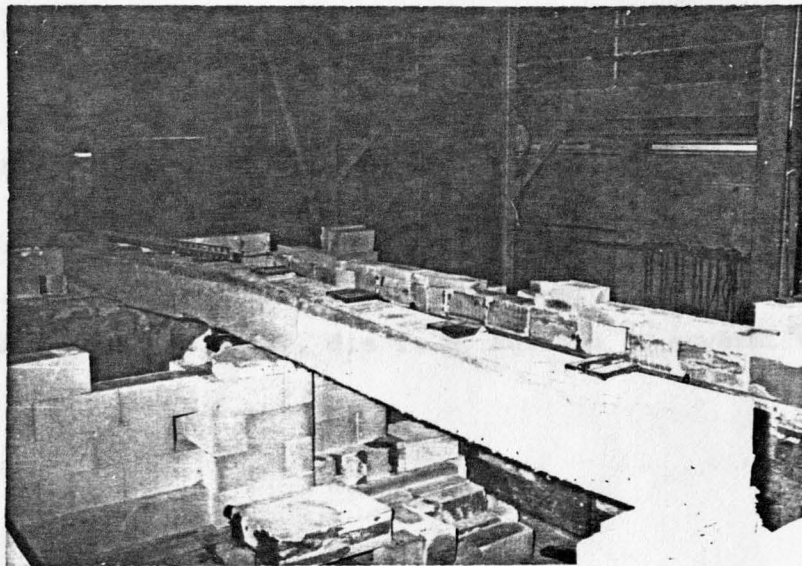
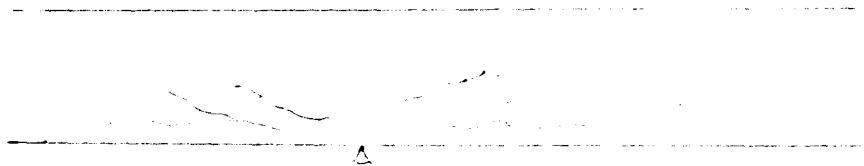


Bild 49: Balken 27 nach dem Wiedererkalten. Der Versuch wurde in einem etwas früheren Stadium als Balken 26 abgebrochen (vergl. Anlage 6.27) das Bruchbild ist weniger deutlich sichtbar, da sich der Balken nach Entlastung und Erkalten rückverformte.

4.6.28 Versuchskörper 28 (Zweifeldbalken, Bilder 50 und 51)

18. Versuchsminute: durch Feuchtigkeit werden bereits in beiden Feldern Schrägrisse markiert zwischen Lasteintragungspunkten und Mittelaufleger;
20. Versuchsminute: Rißbildung auch im Bereich der Endauflager;
26. Versuchsminute: Biegezugrisse auf der Balkenoberseite im Bereich des Mittelauflegers, Abstand durch Bügel vorgegeben;
33. Versuchsminute: die in der 18. Minute beobachteten Risse verlaufen unter  $\sim 45 - 50^\circ$  von den dem Mittelaufleger nächstgelegenen Lasteintragungspunkten zum Mittelaufleger; flachere Rißneigung ( $\sim 30^\circ$ ) im Endauflagerbereich;
49. Versuchsminute: waagerechte Risse im unteren Stegbereich zwischen den Lasteintragungspunkten und dem Mittelaufleger;
53. Versuchsminute: waagerechte Risse (unterer Stegbereich) im Bereich der maximalen Feldmomente;
58. Versuchsminute: die in der 49. Minute beobachteten waagerechten Risse wandern als Schrägrisse nach oben;
63. Versuchsminute: Rißtendenz



Risse im unteren Stegbereich deutlicher ausgeprägt als die im oberen Bereich in der 18. Minute festgestellten;

70. Versuchsminute: Risse weiten sich langsam, Rißweite  $\lesssim 2$  mm;
72. Versuchsminute: Biegezugrisse unten im Bereich maximaler Feldmomente;
73. Versuchsminute: enger Schrägrißabstand, im Feld 2 etwas stärkere Ausbildung, Rißweite unten deutlich größer als oben;
75. Versuchsminute: Rißweite Feld 2 maximal  $\sim 3$  mm;
80. Versuchsminute: Rißweite Feld 2 maximal  $\sim 5$  mm;

Der Versuchskörper versagte nach Bildung klaffender Risse in Richtung der Hauptzugspannungstrajektorien durch Bruch des Steges mit nachfolgendem Bruch der Biegedruckzone ohne Bruch der Bügel, die i. M. auf  $595^\circ\text{C}$  erwärmt wurden (Vertikalschenkel).

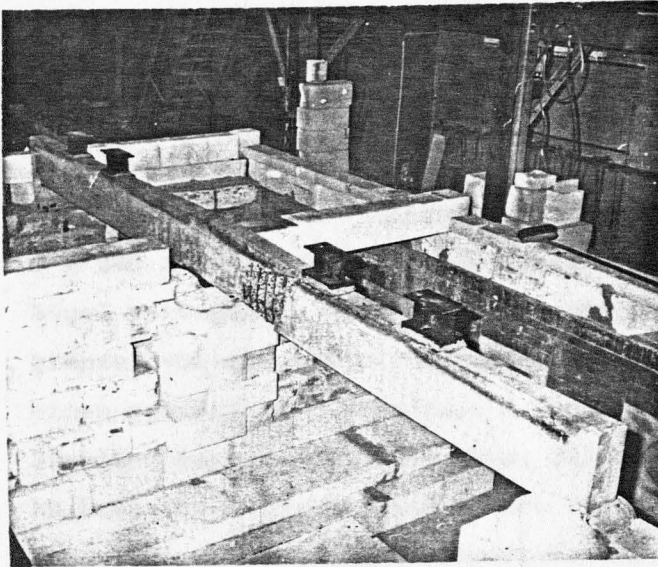


Bild 50:

Balken 28 nach dem Wiedererkalten. Die Betonschale außerhalb des Bügelkorbes fiel im Augenblick des Versagens herunter

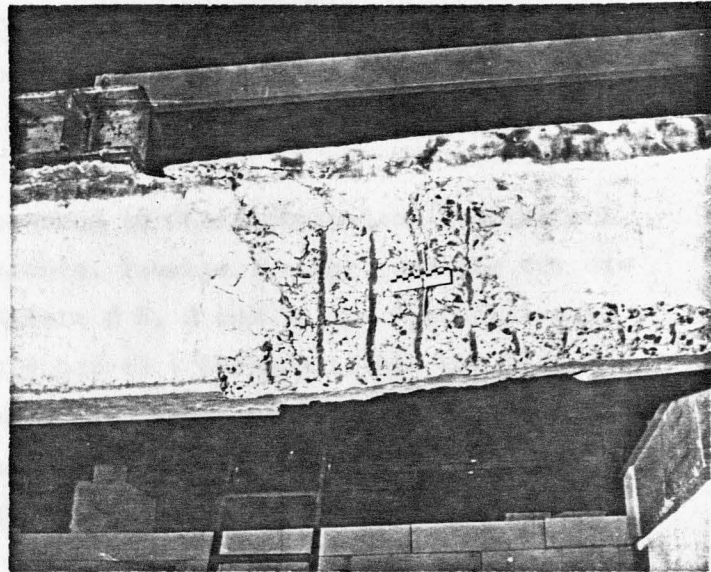


Bild 51:

Schubbruch im Mittelauflagerbereich des Balkens 28

## 5. Diskussion der Versuchsergebnisse

### 5.1 Einfeldsysteme

Als Einfeldsystem wurden die Balken Nr. 1 - 7, 10, 13 - 15 und 18 untersucht. Querschnittsabmessungen und Bewehrungsführung entsprachen bei allen diesen Balken - außer Nr. 7 und 18 - den Anforderungen, die in DIN 4102 Teil 4 (E) für die Feuerwiderstandsklasse F 90 erhoben werden. Nr. 7 und 18 waren für die Feuerwiderstandsklasse F 30 ausgelegt, abweichend von allen anderen war Balken Nr. 18 indirekt gelagert und besaß ein I-Profil. Balken Nr. 15 wurde ohne Schubbewehrung ausgeführt und war im übrigen mit Nr. 14 identisch. Alle Balken befanden sich im Schubbereich 2, nur bei Balken 18 war  $\tau_o = \tau_{03}$ .

Einzelheiten sind den Tabellen 1 und 2 zu entnehmen.

Für alle Balken - außer Nr. 15 und 18 - ist festzustellen, daß keine Schubbrüche auftraten. Alle Balken versagten durch Fließen der Biegezugbewehrung im Bereich maximaler Momente. Die erwartete Größenordnung der kritischen Stahltemperatur wurde in allen Fällen erreicht.

Die Bügel waren so bemessen, daß ihre Spannung im Gebrauchszustand theoretisch  $\sigma = 240 \text{ N/mm}^2$ , den zulässigen Wert, erreichte. Tabelle 3 zeigt, daß die für die Bügel verwendeten kaltverformten Rippenstähle  $\emptyset 6, 8$  und  $10$  die Mindeststreckgrenze, von einer Ausnahme abgesehen, um 4 bis 13 % überschritten. Das bedeutet einen geringeren vorhandenen Ausnutzungsgrad und damit ein Steigen der kritischen Stahltemperatur. Nach [3] wären Versagenstemperaturen der Bügel  $T_{\text{crit}} \lesssim 550^\circ\text{C}$  zu erwarten gewesen. Dieser Wert wurde in den Versuchen jedoch weit überschritten, ohne daß die Bügel versagten.

Die Versuchsbeobachtungen zeigen, daß die "Schubrißlast" schon in relativ frühen Versuchsstadien erreicht wurde. Beim Balken 4 wurden Risse, den Druckspannungstrajektorien folgend, schon in der 12. Versuchsminute beobachtet. Das war durch besonders "günstige" Rußablagerung möglich. Die Risse waren aber so eng, daß sie, nachdem der Ruß weggebrannt war, nicht mehr wahrgenommen werden konnten.

Als Schubrißlast ist hier nicht eine gegenüber der Gebrauchslast erhöhte mechanische Beanspruchung [10, 11], sondern - bei konstanter äußerer Last - eine durch Wärme verminderte mechanische Beanspruchbarkeit zu verstehen.

Erst in späteren Versuchsstadien, etwa ab der 60. Versuchsminute, weiteten sich die Schrägrisse so, daß sie wieder sichtbar wurden. Zum Bruch führten sie jedoch nicht.

Aus dem Verhalten dieser Einfeldsysteme wird deutlich, daß die Bügel bis zum Versagen der Balken die ihnen nach der erweiterten Fachwerkanalogie zugewiesenen Kräfte nicht voll übernehmen mußten.

Mit Definition und zutreffender Festlegung einer "Schubrißtemperatur" - analog zur Schubrißlast bei Raumtemperatur - könnte vielleicht ein Ansatzpunkt gegeben sein, die Bügelbeanspruchung und ihre zu erwartende Versagenstemperatur theoretisch zu bestimmen.

Ein von der erweiterten Fachwerkanalogie extrem abweichendes Tragwerksmodell ist der Zugbandbogen bzw. das Sprengwerk. Diese Modelle funktionieren völlig ohne Bügel. Voraussetzung ist aber, daß das Zugband - die Biegezugbewehrung - ungeschwächt über die ganze Stützweite vorhanden ist.

In den Versuchen haben sich die Balken, bei denen die Biegezugbewehrung nach der Zugkraftdeckungsline gestaffelt war, nicht schlechter verhalten als die mit ungeschwächter Längsbewehrung. Eine Kombination der beiden Modellvorstellungen erklärt dies: Während ein großer Anteil der Lasten über Sprengwerks- oder Bogenwirkung abgetragen werden konnte, entfielen auf das gedachte Fachwerk und damit auf die Bügel nur geringe Lastanteile, wodurch deren kritische Temperatur deutlich erhöht wurde. Das Fachwerk für den Restabtrag kann auch als System von Sekundärbögen interpretiert werden, die im Feld enden und deren vertikale Auflagerkomponenten an den vorhandenen Bügeln "aufgehängt" werden.

Auch der Balken Nr. 18, der infolge Schubversagens zu Bruch ging, entspricht dieser Modellvorstellung. Hier war der relativ schmale Steg ( $t = 80 \text{ mm}$ ) das schwächste Glied und leitete den Schubbruch ein, der dann auf den Druckflansch überging. Auch hier wurden die Bügel weit über ihre erwartete kritische Temperatur erwärmt, ohne zu versagen.

Das Verhalten des Balkens Nr. 15 ist mit den vorstehenden Ausführungen nicht ausreichend erklärt. Er war bei  $\tau_o = \tau_{o2}$  ohne Bügel hergestellt, und seine Biegezugbewehrung war nach der Zugkraftdeckungsline gestaffelt. Der Balken erreichte sicher die Feuerwiderstandsdauer, die bei ordnungsgemäßer Bügelbewehrung zu erwarten gewesen wäre und versagte dann durch Schubbruch, der vom 150 mm dicken Steg ausgehend die Biegedruckzone zerstörte. Auch bei diesem Prüfkörper konnte ein großer Anteil der Belastung über einen Zugbandbogen abgetragen werden. Jedoch standen zur Aufnahme der restlichen vertikalen Zugkomponenten keine Bügel zur Verfügung.

Es muß angenommen werden, daß die Kornverzahnung der Schubrißufer und die Verdübelungswirkung der Längsbewehrung, die im allgemeinen als Nebenwirkungen betrachtet werden, hier aktiviert wurden und beträchtliche Größenordnungen annehmen. Die Verdübelungswirkung der Längsbewehrung war günstig beeinflusst, weil besonders große Betonüberdeckung - aus Wärmeisolierungsgründen - vorhanden war.

Das Teilprogramm "Einfeldsysteme" wurde nicht auf die Untersuchung von Balken höherer Feuerwiderstandsklassen (F 120, F 180) ausgedehnt, da sich die Mehrfeldsysteme als die ungünstigeren erwiesen und von ihnen Rückschlüsse auf die Einfeldbalken möglich waren.

## 5.2 Mehrfeldsysteme

Als Mehrfeldsysteme wurden die Balken Nr. 8, 9, 11, 12, 16, 17, 19 - 28 untersucht. Es handelte sich ausnahmslos um Zweifeldbalken mit zwei gleichen Feldern und zur Mittelstütze symmetrischer Belastung. Querschnittsabmessungen und Bewehrungsführung entsprachen bis Balken Nr. 17 und bei Balken Nr. 28 den Anforderungen, die in DIN 4102 Teil 4 (E) für die Feuerwiderstandsklasse F 90 erhoben werden; die Balken Nr. 19 - 27 entsprachen F 180. Abweichend von den anderen, die Plattenbalken- oder Rechteckprofil hatten, wurde Balken Nr. 17 als I-Profil für F 30 ausgebildet. Die Balken befanden sich im Schubbereich 2 oder 3.

Einzelheiten sind den Tabellen 1 und 2 zu entnehmen.

Bei allen Balken - außer Nr. 25 - wurden Schubbrüche erzeugt.

Werden Stahlbeton-Durchlaufbalken einer Brandbeanspruchung ausgesetzt, so erzeugt die Behinderung der Durchbiegung, die durch die von Balkenunterseite bis Oberseite abnehmende Temperaturdehnung hervorgerufen wird, Zwangmomente, die die Stützbereiche zusätzlich beanspruchen. Wenn die Biegedruckzone nicht vorzeitig versagt, ist die Momentenumlagerung begrenzt durch das Erreichen der Fließgrenze der obenliegenden, noch wenig erwärmten Biegezugbewehrung. Bei  $v = 1,75$  kann also die Biegezugkraft und - bei Vernachlässigung der Veränderung des Hebelarms der inneren Kräfte - auch das Stützmoment auf das 1,75-fache des Ausgangszustands anwachsen. Damit verbunden ist auch ein Anwachsen der Querkraft und der Schubspannungen im Bereich der Zwischenstützen. System- und belastungsabhängig steigert sich die Querkraft um rd. 25 %, wenn eine Momentensteigerung um 75 % zugrundegelegt wird.

Durchlaufsysteme müssen demnach hinsichtlich der Schubbeanspruchung im Brandfall als die ungünstigeren angesehen werden, was durch die Versuchsergebnisse bestätigt wird.

### 5.2.1 Zweifeldsysteme für die Feuerwiderstandsklassen $\leq$ F 90

Bei den F 90-Balken Nr. 8, 11 und 12 handelte es sich um Einzellastbalken mit  $M_{\text{Stütz}}/Q \cdot h = 2,5$ , die im Schubbereich 2 lagen; bei Nr. 16 und 28 war mit gleichem Momenten-Schubverhältnis  $\tau_o = \tau_{o3}$ . Balken 9 war ein Gleichlastbalken mit  $l/h = 12$  im Schubbereich 2.

Bei allen Balken wurden die Mindestforderungen der DIN 1045 eingehalten, jedoch konnte bei Nr. 16 und 28 die für den Schubbereich 3 verlangte Balkendicke  $d \geq 450$  mm (DIN 1045, Abschn. 17.5.3) nicht erfüllt werden, da die vorhandene Pressenkapazität nicht mehr ausreichte. Daher wurde die Balkendicke hier mit  $d = 400$  mm festgelegt. Bei denselben Balken bedingte die hohe vorgegebene Querkraft bei dem gewünschten Momenten-Schubverhältnis eine kräftige Biegedruckbewehrung, die, im Bereich hoher Schubspannung untenliegend, stark erwärmt wurde. Es läßt sich jedoch nicht beurteilen, ob dadurch eine Beeinflussung des Brandverhaltens gegeben war. Beide Versuchsergebnisse lagen mit 89 und 84 min an der unteren Grenze des Sollwerts, jedoch erreichte auch Balken Nr. 8 (ohne  $F'_e$ ) nur 85 min.

Eine signifikante Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch die Variation der Parameter ist somit nicht festzustellen.

Der F 30-Balken Nr. 17 entsprach im System dem Balken Nr. 16, hatte jedoch I-Querschnitt. Mit einer Stegdicke  $f = 80$  mm überschritt er die angestrebte Feuerwiderstandsdauer deutlich. Für die Praxis hat diese Querschnittsform wenig Bedeutung, da I-Profile fast ausnahmslos als Fertigteile hergestellt und nur in den seltensten Fällen dann durch Ortbeton zu Durchlaufsystemen ergänzt werden. Für das hier durchgeführte Versuchsprogramm stellt dieser Balken jedoch eine aussagekräftige Ergänzung dar.

### 5.2.2 Zweifeldsysteme für die Feuerwiderstandsklasse F 180

Für F 180 wurden die Balken Nr. 19 - 27 ausgelegt. Bei allen außer Nr. 21 lag die Schubspannung an der oberen zulässigen Grenze,  $\tau_o = \tau_{o3}$ . Wie bei den F 90-Balken mußte auch hier die nach DIN 1045 geforderte Minstdicke von  $d = 450$  mm auf  $d = 400$  mm verringert werden.



Je ein Einzellast- und ein Gleichlastbalken (Nr. 19 und 24) wurden mit zweischnittigen Bügeln ausgebildet; bei Nr. 24 bestand die Schubbewehrung aus Schrägaufbiegungen und Bügeln. Beide Balken versagten weit vor der Zeit, so früh, wie es nicht zu erwarten war. Eine schlüssige Erklärung für dieses Verhalten kann vorläufig nicht gegeben werden; es muß jedoch angenommen werden, daß die zweischnittigen Bügel bei einer Erwärmung auf  $510^{\circ}\text{C}$  bzw.  $520^{\circ}\text{C}$  an der Grenze ihrer Tragfähigkeit angekommen waren, obwohl Fließerscheinungen nicht festgestellt werden konnten. Das "bügellose" System war dann - abweichend von den bei Einfeldsystemen gemachten Erfahrungen und trotz noch relativ geringer Durchwärmung - nicht mehr in der Lage, die Kräfte abzuleiten. Auch die bei Balken 24 vorhandenen Schrägaufbiegungen konnten den Bruch nicht deutlich verzögern.

Als wirksame Verbesserung erwiesen sich vierschnittige Bügel, die bei den Versuchskörpern Nr. 20 - 23 und 25 - 27 angeordnet wurden. Die bei Balken Nr. 22 vorhandene Schubsicherung durch eine Kombination von vierschnittigen Bügeln und Schrägaufbiegungen sowie die zusätzlichen Schrägaufbiegungen des Balkens Nr. 23 beeinflussten das Verhalten nicht deutlich.

Bei den bevorzugt untersuchten Einzellastsystemen mit  $M/Q \cdot h \sim 2,5$  wurde die angestrebte Feuerwiderstandsdauer von  $\geq 180$  min jedoch nicht erreicht. Erst der Balken Nr. 25 mit  $M/Q \cdot h \sim 1,5$  erreichte F 180 sicher. Es muß jedoch dazu bemerkt werden, daß sich hier eine sehr auflagernahe Laststellung ergeben hatte ( $a/h = 2,14$ ), so daß nicht das Momenten-Schubverhältnis allein für den positiven Effekt maßgebend sein dürfte.

Besseres Verhalten zeigten die beiden Gleichlastbalken Nr. 26 ( $l/h \sim 7$ ) und Nr. 27 ( $l/h \sim 10$ ). Sie hielten länger als 180 min stand. Beide Balken zeigten eine bis dahin nicht beobachtete Bruchentwicklung:

Unter einem Lasteintragungspunkt etwa im Bereich maximaler Feldmomente bildeten sich steil, annähernd senkrecht verlaufende Stegrisse, deren größte Weite etwa bei  $d/3$  beobachtet wurde; erst später wurden Schrägrisse im Bereich der Mittelstütze deutlich. Eine rapide Erweiterung der erstgenannten Risse im Endstadium des Versuchs leitete das Balkenversagen ein (Primärbruch), wobei auch der Mittelstützenbereich brach (Sekundärbruch). Bei den für geringere Feuerwiderstandszeiten konzipierten Balken wurden solche Erscheinungen - auch im Ansatz - nicht beobachtet.



Auch bei den Zweifeldsystemen für die Feuerwiderstandsklasse F 180 kann eine eindeutige Aussage über den Einfluß aller untersuchten Parameter auf das Brandverhalten nicht gemacht werden. Festzuhalten ist jedoch

- deutliche Verlängerung der Feuerwiderstandsdauer durch vierschnittige Bügel,
- längere Feuerwiderstandsdauer bei Gleichlastbalken gegenüber vergleichbaren Einzellastbalken.

Bei Schubversuchen an Durchlaufträgern unter Raumtemperatur wurde ein negativer Einfluß des schlechteren Verbundes der im Zwischenstützenbereich obenliegenden Biegezugbewehrung festgestellt [11, 12]. Es wurde jedoch darauf verzichtet, dieses Kriterium auch für den Brandfall zu untersuchen und etwa durch zusätzliche Verbundsicherungsmaßnahmen das Verhalten der F 180-Balken zu beeinflussen. Die oberen Balkenzonen sind gerade bei langer Beanspruchung und entsprechend großen aufzuheizenden Massen so viel geringer wärmebeaufschlagt als die unteren, daß dadurch der bei Raumtemperatur schlechtere Verbund mehr als ausgeglichen sein dürfte. Die ohnehin bei brandbeanspruchten Durchlaufbalken geforderte Verlängerung der Stützbewehrung kommt noch vergünstigend hinzu.

### 5.2.3 Tragwirkung der Zweifeldsysteme

Für die Lastabtragung der Zweifeldbalken und von Durchlaufbalken allgemein kann das unter 5.1 angedeutete Modell übernommen und erweitert werden.

Der Hauptabtrag erfolgt ohne Inanspruchnahme von Zugvertikalen über Bögen oder Sprengwerke von Auflager zu Auflager. Dafür ist ein Teil der Biegezugbewehrung als Zugband hinter den Auflagern verankert. Außerdem stützen sich die Bögen feldweise gegeneinander ab. Der Rest wird über ein Fachwerk abgetragen, dessen Untergurtkräfte zu den Auflagern hin kleiner werden und im Mittelstützenbereich das Vorzeichen wechseln. Die Zugvertikalen (Bügel) erhalten nur einen Teil der ihnen in der Bemessung zugewiesenen Beanspruchung und versagen daher nicht bei ihrer erwarteten kritischen Temperatur. Die Kontinuität des Systems wird durch das obenliegende Zugband (Biegezugbewehrung) über der Innenstütze gewährleistet. Das Fachwerk für den Restabtrag kann auch als System von Sekundärbögen interpretiert werden, die im Feld enden und deren vertikale Auflagerkomponenten an den vorhandenen Bügeln "aufgehängt" werden.

## 6. Empfehlungen für die Neufassung DIN 4102 Teil 4

Aus praktischen Gründen wird hier eine Unterteilung entsprechend der für DIN 4102 Teil 4 vorgesehenen Art durchgeführt. Da sich die Durchlaufsysteme als die für Schubversagen anfälligeren erwiesen haben, wird die Darstellung der Empfehlungen für die statisch unbestimmt gelagerten Balken vorgenommen und die Bemessung der statisch bestimmt gelagerten Systeme - immer eine Vergünstigung - davon abgeleitet.

DIN 4102 geht von folgenden konstruktiven Maßnahmen aus, um das Brandverhalten von Stahlbetonbalken zu beeinflussen:

- Variation des Betonquerschnitts, insbesondere Forderung einer Mindestbalkenbreite,
- Variation der Betondeckung der Biegezugbewehrung; Forderung einer Mindestbetondeckung,
- Bewehrungsführung, insbesondere bei Durchlaufsystemen Verlängerung der Stützbewehrung.

Die beiden letztgenannten Parameter wurden bei den durchgeführten Versuchen nicht variiert, sondern gemäß DIN 4102 Teil 4 (E) gewählt.

### 6.1 Dreiseitig beanspruchte, statisch unbestimmt gelagerte Balken

Bild 52 gibt einen Überblick über die bei unterschiedlicher Balkenbreite erzielten Versuchsergebnisse für Zweifeldbalken. Eingetragen ist ferner die in DIN 4102 Teil 4 (E) verlangte Mindestbreite von dreiseitig brandbeanspruchten, statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonbalken bestimmter Feuerwiderstandsdauer.

Es zeigt sich, daß für Feuerwiderstandsklassen  $\leq$  F 90 die Gefahr vorzeitigen Schubversagens nicht gegeben ist, wenn nach dem vorliegenden Normentwurf konstruiert wird.

Für Balken der Feuerwiderstandsklasse F 120 und F 180 werden vierschnittige Bügel empfohlen, da sie in den Versuchen die Feuerwiderstandsdauer entscheidend verbessert haben. Die Betondeckung der außen- und untenliegenden Bügelschenkel braucht gegenüber den in DIN 1045 geforderten Mindestwerten nicht vergrößert zu werden,

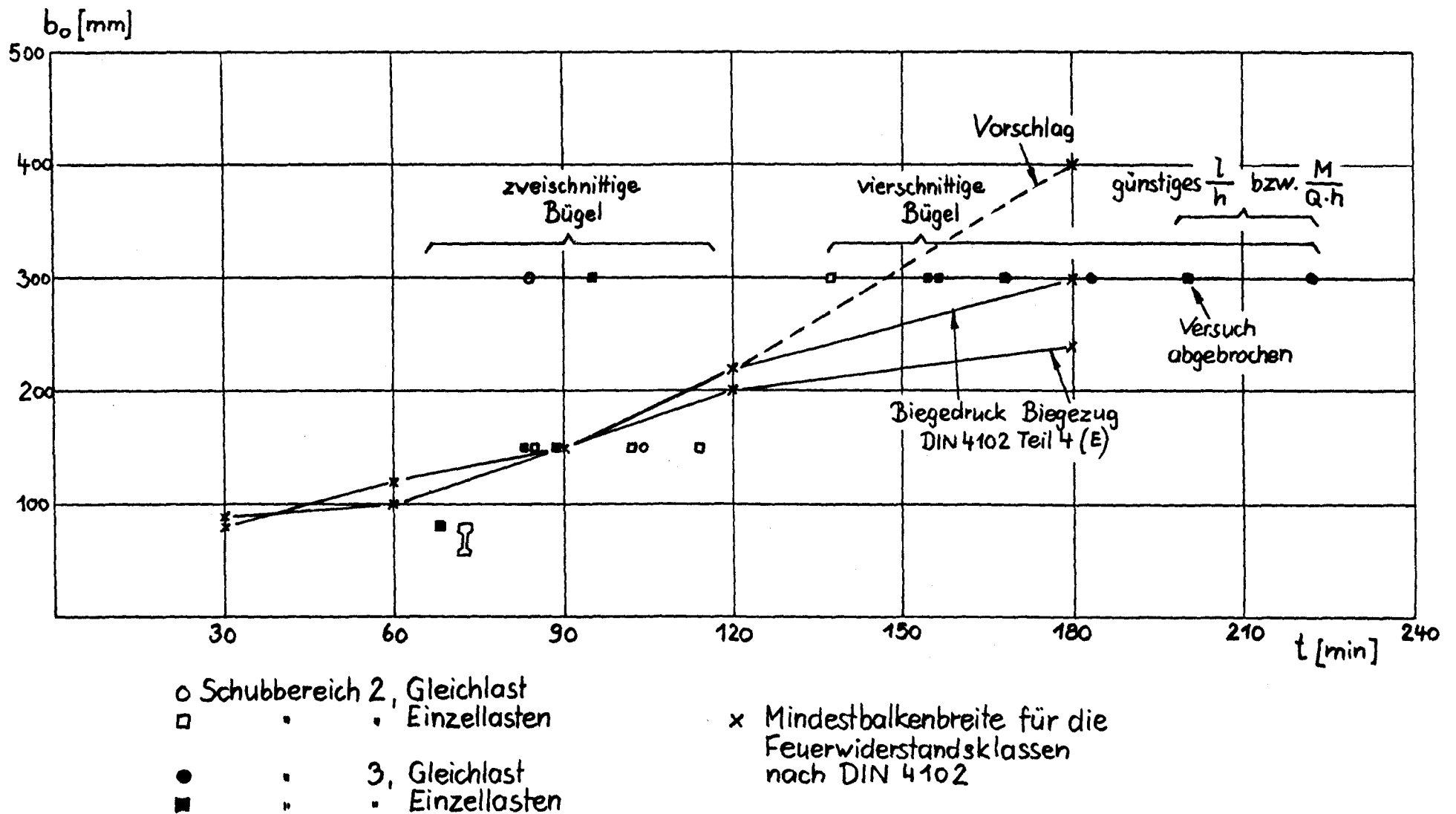


Bild 52: Versuchsergebnisse der Zweifeldsysteme (Balken Nr. 8, 9, 11, 12, 16, 17, 19 - 28)

obwohl eine solche Maßnahme u. U. vergünstigenden Einfluß haben würde. Wegen des damit verbundenen Verlustes an statischer Balkenhöhe wie an für die Längsbewehrung verfügbarer Balkenbreite und der erforderlich werdenden zusätzlichen Schutzbewehrung der äußeren Betonschale wird von einer solchen Forderung abgesehen.

Die Mindestbalkenbreite von 300 mm genügt aber nicht, in jedem Belastungsfall ausreichende Sicherheit gegen vorzeitiges Schubversagen zu gewährleisten. Es wird daher eine Mindestbreite von  $b = 400$  mm empfohlen.

Die Wirksamkeit dieser Maßnahme wurde zwar nicht in Versuchen direkt belegt. Durch den vergrößerten Querschnitt wird jedoch dessen Wärmekapazität erhöht und die Erwärmung deutlich verzögert. Das bedeutet sowohl für die im Stützbereich untenliegende Biegedruckzone einschließlich etwaiger Biegedruckbewehrung als auch für die Betondruckstreben eine höhere verbleibende Festigkeit. Entsprechendes gilt für die inneren Schenkel der vierschnittigen Bügel. Es darf daher erwartet werden, daß sich bei gleicher Beanspruchung der breitere Balken besser verhält als der schmalere.

Im Entwurf DIN 4102 Teil 4 werden bei hohen Feuerwiderstandsklassen für den Biegezugbereich geringere Mindestbalkenbreiten angegeben als für den Biegedruckbereich. Ob das hinsichtlich des Schubverhaltens immer zulässig ist, muß bezweifelt werden, da bei ungünstiger Laststellung (Einzellasten) auch im Biegezugbereich - gemeint ist hier der Bereich des Balkens, wo die Biegezugzone unten, in direkter Beflammung, liegt - hohe Querkraftbeanspruchung auftreten kann. Es wird daher vorgeschlagen, für die Feuerwiderstandsklassen F 120 und F 180 keine Unterscheidung dieser Art zu machen.

Somit ergeben sich folgende Empfehlungen für

- Mindestbreite  $b$  von dreiseitig beanspruchten, statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonbalken (Normalbeton)

F 30, F 60, F 90: keine besonderen Forderungen

F 120:  $b_{\min} = 220$  mm

F 180:  $b_{\min} = 400$  mm

- Mindestachsabstand  $u$  und Anordnung der Biegezugbewehrung für Balken der o.a. Art

F 30 - F 180: keine besonderen Forderungen

- Anordnung der Schubbewehrung (Bügel) für Balken der o. a. Art

- F 30, F 60, F 90: keine besonderen Forderungen
- F 120, F 180: für den Schubbereich 1 keine besonderen Forderungen,  
für die Schubbereiche 2 und 3 Anordnung von mindestens  
vierschnittigen Bügeln, deren Betondeckung gemäß DIN 1045  
gewählt werden kann.

6.2 Dreiseitig beanspruchte, statisch bestimmt gelagerte Balken

Bei Einfeldsystemen kann mit ausreichender Wahrscheinlichkeit angenommen werden, daß die im Entwurf der DIN 4102 Teil 4 geforderten Mindestbalkenbreiten auch für die höheren Feuerwiderstandsklassen ausreichen. Das Brandverhalten der untersuchten F 90-Balken läßt diesen Schluß zu. Allerdings sollte auch hier auf die Anordnung von vierschnittigen Bügeln nicht verzichtet werden.

Die Empfehlungen lauten daher für

- Mindestbreite b und Stegdicke t von dreiseitig beanspruchten, statisch bestimmt gelagerten Stahlbetonbalken (Normalbeton)

- F 30 - F 180: keine besonderen Forderungen

- Mindestachsabstand u und Anordnung der Biegezugbewehrung für Balken der o.a. Art

- F 30 - F 180: keine besonderen Forderungen

- Anordnung der Schubbewehrung (Bügel) für Balken der o.a. Art

- F 30, F 60, F 90: keine besonderen Forderungen
- F 120, F 180: für den Schubbereich 1 keine besonderen Forderungen,  
für die Schubbereiche 2 und 3 Anordnung von mindestens vier-  
schnittigen Bügeln, deren Betondeckung gemäß DIN 1045 ge-  
wählt werden kann.

6.3 Einachsig gespannte, statisch unbestimmt gelagerte Rippendecken

Besondere Aufmerksamkeit verdienen nach unten offene durchlaufende Stahlbetonrippendecken, die im Bereich negativer Momente Massiv- oder Halbmassivstreifen aufweisen. Für sie sind in DIN 4102 Teil 4 Vergünstigungen hinsichtlich der erforderlichen Rippenbreite vorgesehen. Dazu haben günstige Versuchsergebnisse, die im Rahmen der amtlichen Materialprüfung erzielt worden waren (nur teilweise ver-

öffentlich in [15]), geführt. Bedingt sollten diese Vergünstigungen auch hinsichtlich der Schubbeanspruchung gewährt werden:

Im Bereich negativer Momente (Gebrauchszustand) und großer Querkräfte stehen ausreichende Balkenbreiten (Halbmassivstreifen) zur Verfügung, so daß dieser Bereich nicht besonders betrachtet zu werden braucht. Am Anschnitt zum Halbmassivstreifen kann noch hohe Schubbeanspruchung vorhanden sein; Biegemomente werden dort aber erst im Verlauf der Brandbeanspruchung erzeugt. Die Gesamtbeanspruchung ist somit günstiger als bei einem normalen Durchlaufbalken, insbesondere bei Gleichlastbalken, bei denen im verbleibenden Restbereich die Schubbeanspruchung stetig bis zum Ort des maximalen Feldmoments abnimmt.

Für Gleichlastsysteme bestehen keine Bedenken, die vorgesehene Vergünstigungen zulassen.

Etwas ungünstiger liegen die Verhältnisse bei Einzellast. Rippendecken, bei denen volle Schubbeanspruchung bis zum Ort des maximalen Feldmoments vorhanden sein kann. Solche Systeme wurden bisher nicht untersucht, und es kann vorläufig für sie keine Vergünstigung empfohlen werden.

Es wird daher empfohlen, für

- Mindestbreite  $b$  von einachsig gespannten, statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonrippendecken (Normalbeton) ohne Zwischenbauteile mit Massiv- oder Halbmassivstreifen
  - F 30, F 60: keine besonderen Forderungen
  - F 90: keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung,  
 $b_{\min} = 150 \text{ mm}$  bei Decken mit großem Einzellastanteil,
  - F 120: keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung,  $b_{\min} = 220 \text{ mm}$  bei Decken mit großem Einzellastanteil,
  - F 180: keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung,  $b_{\min} = 400 \text{ mm}$  bei Decken mit großem Einzellastanteil.
- Mindestachsabstand  $u$  und Anordnung der Biegezugbewehrung für Decken der o.a. Art
  - F 30 - F 180: keine besonderen Forderungen.

- Anordnung der Schubbewehrung (Bügel) für Decken der o.a. Art

F 30, F 60, F 90: keine besonderen Forderungen

F 120, F 180: für den Schubbereich 1 keine besonderen Forderungen,  
für die Schubbereiche 2 und 3 Anordnung von mindestens  
vierschnittigen Bügeln, deren Betondeckung gemäß DIN 1045  
gewählt werden kann.

- Als "großer Einzellastanteil" möge ein Anteil von  $\geq 40\%$  am Rechenwert der  
Schubspannung  $\tau_0$  verstanden sein.

6.4 Zweiachsig gespannte, einfeldrige Rippendecken

Einen weiteren Sonderfall stellen zweiachsig gespannte Rippendecken ohne Zwischenbauteile dar. Hier sind in Brandversuchen nur Einfeldsysteme untersucht worden [15], die ausgezeichnete Ergebnisse lieferten: bei 80 mm unterer Rippenbreite wurden Feuerwiderstandszeiten zwischen 102 min und  $> 150$  min erzielt. Schubbrüche traten dabei nicht auf. Erklärbar ist dieses günstige Verhalten durch die Flächensteifigkeit solcher Systeme, die bei der Ermittlung der Schnittgrößen für den Kaltzustand nicht angesetzt werden darf, sicher aber einen schätzenswerten Beitrag zur Gesamttraglast liefert.

Es scheint vertretbar, den in DIN 4102 Teil 4 vorgesehenen Vergünstigungen für diese Systeme zuzustimmen.

6.5 Zweiachsig gespannte, mehrfeldrige Rippendecken

Untersuchungsergebnisse liegen für solche Systeme nicht vor; es werden hier Analogieschlüsse versucht.

6.5.1 Zweiachsig gespannte, mehrfeldrige Rippendecken mit Massiv- oder Halbmassivstreifen

Auch bei diesen Systemen ist ein positiver Einfluß der unter 6.4 genannten, nicht ansetzbaren Flächensteifigkeit auf das Brandverhalten anzunehmen. Für die Spannrichtung, in der eine Durchlauf- oder sonstige Einspannwirkung vorhanden ist, gelten außerdem die Ausführungen für die einachsigen Rippendecken-Durchlaufsysteme unter 6.3.



Es darf gefolgert werden, daß sich die zweiachsig gespannten unter Brandbeanspruchung besser verhalten als die einachsig gespannten Durchlaufdecken (jeweils mit Massiv- oder Halbmassivstreifen), und es kann der vorgesehenen, etwas größeren Abminderung der erforderlichen Balkenbreite zugestimmt werden für Systeme mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung, wobei die kleinere Mindestrippenbreite auch für die Spannrichtung ohne Durchlaufwirkung eingesetzt werden darf. Aus den unter 6.3 genannten Gründen muß aber bei dem derzeitigen Stand der Kenntnisse für Systeme mit hohem Einzellastanteil eine Vergünstigung abgelehnt werden.

Es werden folgende Empfehlungen gegeben für

- Mindestrippenbreite  $b$  von zweiachsig gespannten, mehrfeldrigen Stahlbetonrippendecken (Normalbeton) ohne Zwischenbauteile mit Massiv- oder Halbmassivstreifen

- |             |  |
|-------------|--|
| F 30, F 60: | keine besonderen Forderungen   |
| F 90:       | keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung, $b_{\min} = 150$ mm bei Decken mit großem Einzellastanteil  |
| F 120:      | keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung, $b_{\min} = 220$ mm bei Decken mit großem Einzellastanteil  |
| F 180:      | keine besonderen Forderungen bei Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung, $b_{\min} = 400$ mm bei Decken mit großem Einzellastanteil. |

- Mindestachsabstand  $u$  und Anordnung der Biegezugbewehrung für Decken der o.a. Art

- |               |                              |
|---------------|------------------------------|
| F 30 - F 180: | keine besonderen Forderungen |
|---------------|------------------------------|

- Anordnung der Schubbewehrung (Bügel) für Decken der o.a. Art

- |                   |   |
|-------------------|---|
| F 30, F 60, F 90: | keine besonderen Forderungen  |
| F 120, F 180:     | für den Schubbereich 1 keine besonderen Forderungen,<br>für die Schubbereiche 2 und 3 Anordnung von mindestens vierschnittigen Bügeln, deren Betondeckung gemäß DIN 1045 gewählt werden kann. |

- Als "großer Einzellastanteil" möge ein Anteil von  $\geq 40$  % am Rechenwert der Schubspannung  $\tau_0$  verstanden sein.

#### 6.5.2 Zweiachsig gespannte, mehrfeldrige Rippendecken ohne Massiv- oder Halbmassivstreifen

Hier kann ein vergünstigender Einfluß auf das Tragverhalten unter Brandeinwirkung allein aus der Flächensteifigkeit (s. 6.4) abgeleitet werden. Einer vorsichtigen Abminderung der erforderlichen Mindestrippenbreiten, wie das in DIN 4102 Teil 4 vorgesehen ist, kann für Decken mit vorwiegend gleichmäßig verteilter Belastung zugestimmt werden. Die vorgeschlagene Mindestbreite  $b = 310 \text{ mm}$  für die Feuerwiderstandsklasse F 180 ist sogar durch den Versuch Nr. 27 des hier vorgelegten Forschungsberichts belegt, wenn vierschnittige Bügel vorhanden sind. Für Decken mit hohem Einzellastanteil müssen die Forderungen, die für Durchlaufbalken gelten, beibehalten werden.

Danach ergeben sich die gleichen Empfehlungen, wie sie unter 6.5.1 zusammengestellt sind.

#### 6.6 Allgemeines zu den Empfehlungen für Rippendecken

Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wurden ausnahmslos an Balken durchgeführt. Sie reichen für die praktische Beurteilung dieses Konstruktionstyps aus, gestatten aber für den komplexen Typ "Rippendecke", insbesondere "zweiachsig gespannte Rippendecke" nur Analogieschlüsse, die weder theoretisch noch auch praktisch befriedigend sind. Zum Beispiel dürfte bei den hohen Feuerwiderstandsklassen die Forderung von vierschnittigen Bügeln bei doch relativ schmalen zulässigen Balken auf beachtliche konstruktive Schwierigkeiten stoßen.

Es ist wünschenswert, das Brandverhalten von Rippendecken - insbesondere hinsichtlich der Schubbruchgefahr - in einigen gezielten Versuchen zu klären. Eine Theoriebildung ist, wenn überhaupt, dann nur mit zusätzlichen Informationen, die in solchen Versuchen gewonnen werden können, möglich.

## 7. Schlußbemerkungen

Es wurde eine Reihe von Stahlbetonbalken in Normbrandversuchen gemäß DIN 4102 auf Schubverhalten geprüft. Alle diese Balken waren nach DIN 1045, Ausgabe 1972, konstruiert, wobei jeweils deren Mindestforderungen eingehalten wurden. Die Schubbewehrung bestand in aller Regel ausschließlich aus vertikalen Umschließungsbügeln.

Dem praktischen Zweck des Forschungsvorhabens entsprechend - Abstimmung der DIN 4102 Teil 4 mit DIN 1045 - konnten nur die vermutlich wichtigsten Einflüsse untersucht werden. So wurde ein Versuchsprogramm festgelegt, in dem die folgenden Parameter variiert wurden:

- Tragwerkssystem; Einfeld- und Zweifeldbalken,
- Belastung; Einzellasten und gleichmäßig verteilte Last,
- Momenten-Schubverhältnis  $M/Q \cdot h$  bzw. Balkenschlankheit  $l/h$ ,
- Höhe des Rechenwerts der Schubspannung  $\tau_o$  und damit volle und verminderte Schubdeckung,
- Betonfestigkeitsklasse,
- Betonquerschnitt; Übereinstimmung mit Mindestforderungen nach DIN 4102.

Wie erwartet, erwiesen sich die Zweifeldbalken als empfindlicher gegen Schubversagen als die statisch bestimmten Einfeldsysteme, bei denen fast ausnahmslos Biegezugbrüche erzeugt wurden. Lediglich ein Einfeld-I-Balken mit dünnem Steg versagte durch Schubbeanspruchung, wobei ein Steg-Betonbruch ausschlaggebend war.

Ein Einfluß der Belastungsart deutete sich nur bei langer Brandbeanspruchung an. Bei allen Balken, die für die Feuerwiderstandsklasse F 90 ausgelegt waren, konnten keine signifikanten Verhaltensunterschiede, hervorgerufen durch die Belastungsart, festgestellt werden. Bei der angestrebten Feuerwiderstandsklasse F 180 verhielten sich jedoch die Gleichlastbalken besser als die Einzellastbalken.

Auch aus Laststellung oder Balkenschlankheit konnte - bedingt durch die begrenzte Anzahl der Versuche - kein signifikanter Einfluß bei Feuerwiderstandsklassen bis F 90 beobachtet werden. Bei einem für F 180 konstruierten Balken, bei dem das Momenten-Schubverhältnis  $M/Q \cdot h = 1,5$  betrug, wurde dagegen eine deutlich längere Feuerwiderstandsdauer erreicht als bei vergleichbaren Balken mit größerem

Ein Einfluß des im Schubbereich 2 verminderten Schubdeckungsgrades war nicht festzustellen.

Die Betonfestigkeitsklasse wurde nur bei drei Versuchen variiert, dabei konnte kein deutlicher Einfluß bemerkt werden.

So bedauerlich es ist, daß intensivere Parameteruntersuchungen, die den wissenschaftlichen Wert der Arbeiten wesentlich erhöht haben würden, unterbleiben mußten, so sind doch die Forschungsergebnisse für die Praxis von Wert:

Auch bei hochbeanspruchten Balken, deren Schubbewehrung aus Umschließungsbügeln besteht, sind für die Feuerwiderstandsklassen F 30, F 60 und F 90 keine besonderen Vorkehrungen hinsichtlich der Schubsicherung notwendig, wenn nach den Angaben der DIN 4102 Teil 4 (E) konstruiert wird.

Bei Balken der Feuerwiderstandsklassen F 120 und F 180 müssen Zusatzmaßnahmen in Form von vierschnittigen Bügeln und in einigen Fällen Verbreiterung des Betonquerschnitts getroffen werden.

Für Stahlbeton-Rippendecken konnten aus den gewonnenen Informationen nur Analogieschlüsse gezogen werden, die nicht voll befriedigen.

Mit der Untersuchung des Einflusses der Schubzulagen, die nach dem neuen Abschnitt 18.8 der DIN 1045, Ausgabe Dezember 1978, zulässig sind, auf das Brandverhalten von Stahlbetonbalken ist inzwischen begonnen worden. Auch hier stellt das Land Nordrhein-Westfalen Mittel zur Verfügung.

Für eine Theoriebildung reichte das durchgeführte Forschungsprogramm nicht aus, da mit den vorhandenen Geldmitteln ein intensives Studium der Parameter nicht möglich war. Immerhin konnte mit den Untersuchungen aber gezeigt werden, daß die Analogien der Lastabtragung, die für Tragwerke unter Raumtemperatur entwickelt worden sind - Zugbandbogen, Sprengwerk und Fachwerk -, auch für den Brandfall sinnvoll sind. Allerdings werden die Bügelspannungen, die nach der Bemessung zugrundeliegenden erweiterten Fachwerkanalogie zu erwarten sind, bis zum Balkenbruch nicht erreicht.

Sollte eines Tages auch die Finanzierung abrundender Grundlagenversuche ermöglicht werden, so daß die Arbeiten in wissenschaftlich befriedigender Weise abgeschlossen werden können, dann dürften die 28 Brandversuche, über die hier berichtet wurde, einen schätzenswerten Grundstock an Informationen bieten.

## Literatur

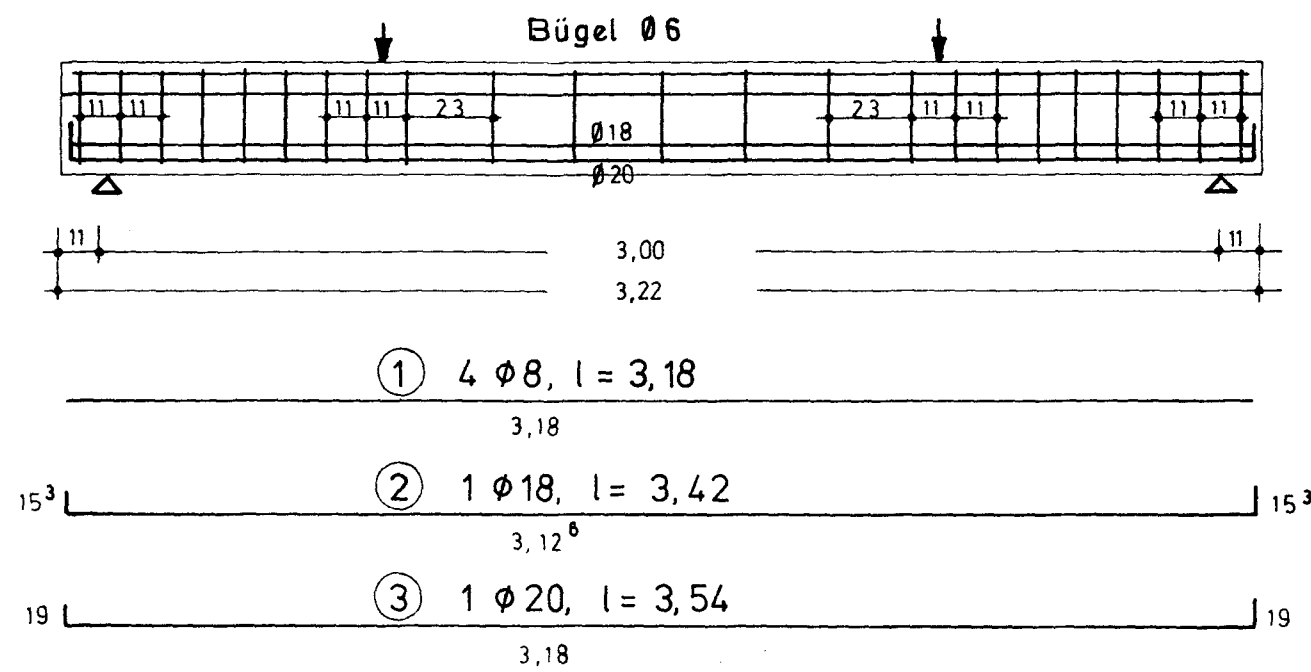
- [1] DIN 1045 "Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung", Fassung 1972.
- [2] DIN 4102 "Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen", Teil 2 "Bauteile - Begriffe, Anforderungen und Prüfungen", Fassung 1977.  
Teil 4 "Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile", Entwurf 1978.
- [3] FIP/CEB Report on methods of assessment of the fire resistance of concrete structural members, Selbstverlag London 1978.
- [4] Institution of Structural Engineers: Design and detailing of concrete structures for fire resistance, Selbstverlag London 1978.
- [5] Kani, G.:  
"Was wissen wir heute über die Schubbruchsicherheit?"  
Der Bauingenieur, Heft 5, 1968.
- [6] Kupfer, H., und T. Baumann:  
"Versuche zur Schubsicherung und Momentendeckung von profilierten Stahlbetonbalken".  
DAfStb, Heft 218, 1972.
- [7] Leonhardt, F., und R. Walther:  
"Beiträge zur Behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau." Schubbewehrung in Beton- und Stahlbetonbau, Heft 12/1961 bis Heft 9/1963.
- [8] Leonhardt, F., und R. Walther:  
"Schubversuche an einfeldrigen Stahlbetonbalken mit und ohne Schubbewehrung".  
DAfStb, Heft 151, 1962.
- [9] Leonhardt, F., und R. Walther:  
"Versuche an Plattenbalken mit hoher Schubbeanspruchung."  
DAfStb, Heft 152, 1962.
- [10] Leonhardt, F., und R. Walther:  
"Schubversuche an Plattenbalken mit unterschiedlicher Schubbewehrung."  
DAfStb, Heft 156, 1963.

- [11] Leonhardt, F., R. Walther und W. Dilger:  
"Schubversuche an Durchlaufträgern."  
DAfStb Heft 163, 1964.
  
- [12] Leonhardt, F., R. Walter und W. Dilger:  
"Schubversuche an indirekt gelagerten, einfeldrigen und durchlaufenden Stahlbetonbalken."  
DAfStb, Heft 201, 1968.
  
- [13] Leonhardt, F., R. Koch und F. Rostásy:  
Schubversuche an Spannbetonträgern."  
DAfStb, Heft 227, 1973.
  
- [14] Leonhardt, F., und E. Mönning:  
Vorlesungen über Massivbau, 2. Auflage, Werner-Verlag, Düsseldorf, 1973.
  
- [15] Meyer-Ottens, C., K. Egner, P. Jagfeld und P. Frech:  
"Brandschutz-Untersuchungen an Wänden, Decken und Dacheindeckungen."  
Berichte aus der Bauforschung, Heft 70, 1971.
  
- [16] Rafla, K., und F. Blume:  
"Systematische Auswertung von Schubversuchen an Stahlbetonbalken."  
Unveröffentlichter Forschungsbericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig, 1977.
  
- [17] Rüschi, H., F.R. Haugli und H. Mayer:  
"Schubversuche an Stahlbeton-Rechteckbalken mit gleichmäßig verteilter Belastung".  
DAfStb, Heft 145, 1962.
  
- [18] Rüschi, H., und G. Vigerust:  
"Schubsicherung bei Spannbeton ohne Schubbewehrung."  
DAfStb, Heft 1937, 1960.

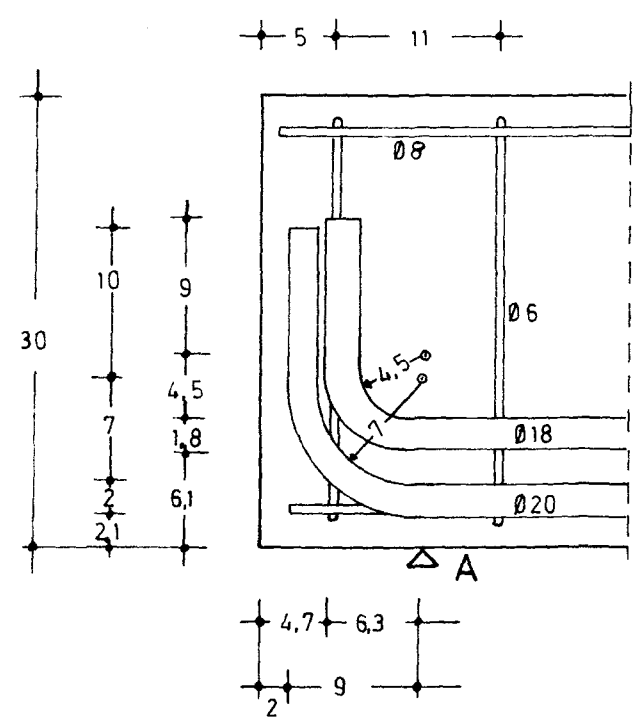
Verzeichnis der Anlagen

1.1 - 1.28	Konstruktionspläne
2.1, 2.2	Prinzip des Versuchsaufbaus
3.6 - 3.8	Temperaturverlauf im Beton
4.1 - 4.18	Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung (ohne 4.8 - 4.12, 4.16, 4.17)
5.1 - 5.28	Temperaturverlauf an den Bügeln (ohne 5.10, 5.15)
6.1 - 6.28	Durchbiegungsverlauf (ohne 6.8, 6.10, 6.25)



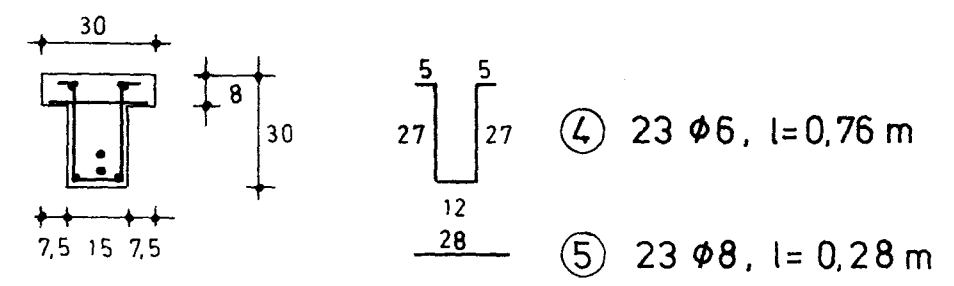
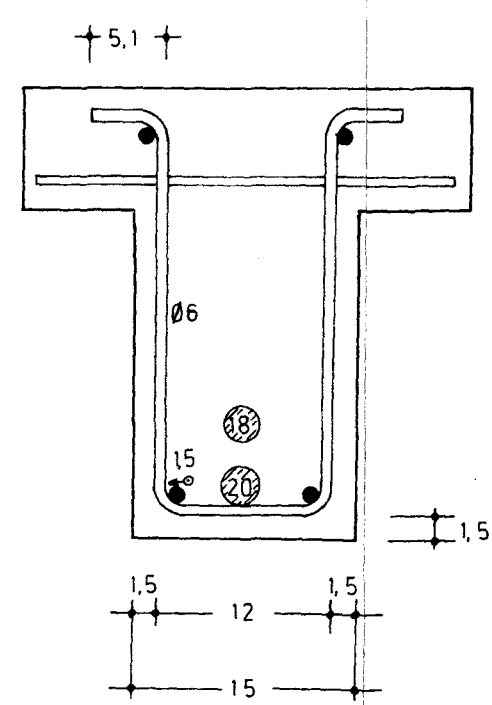


Auflager M. 1:5



Biegerollendurchmesser Ø18 → 5 d  
 Ø20 → 7 d

Querschnitt M. 1:5



Stahlliste:

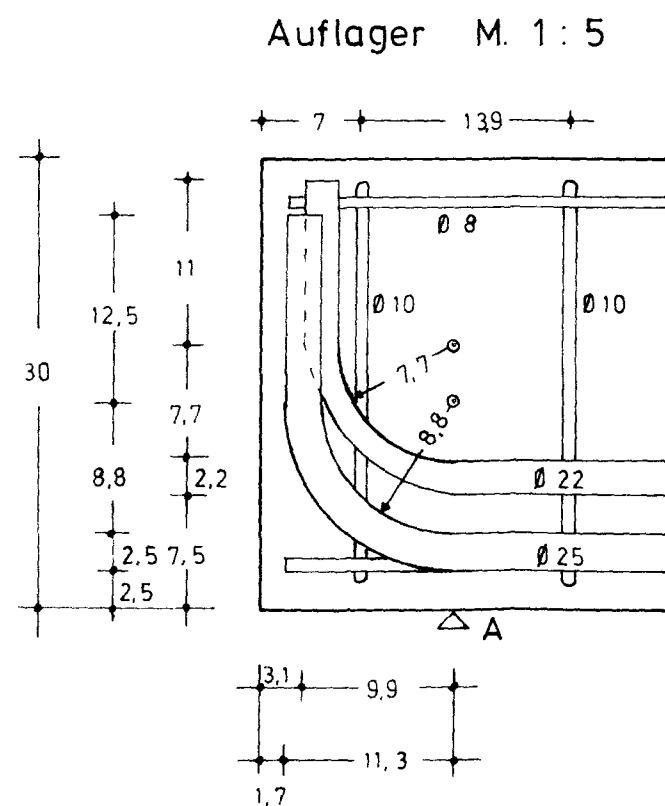
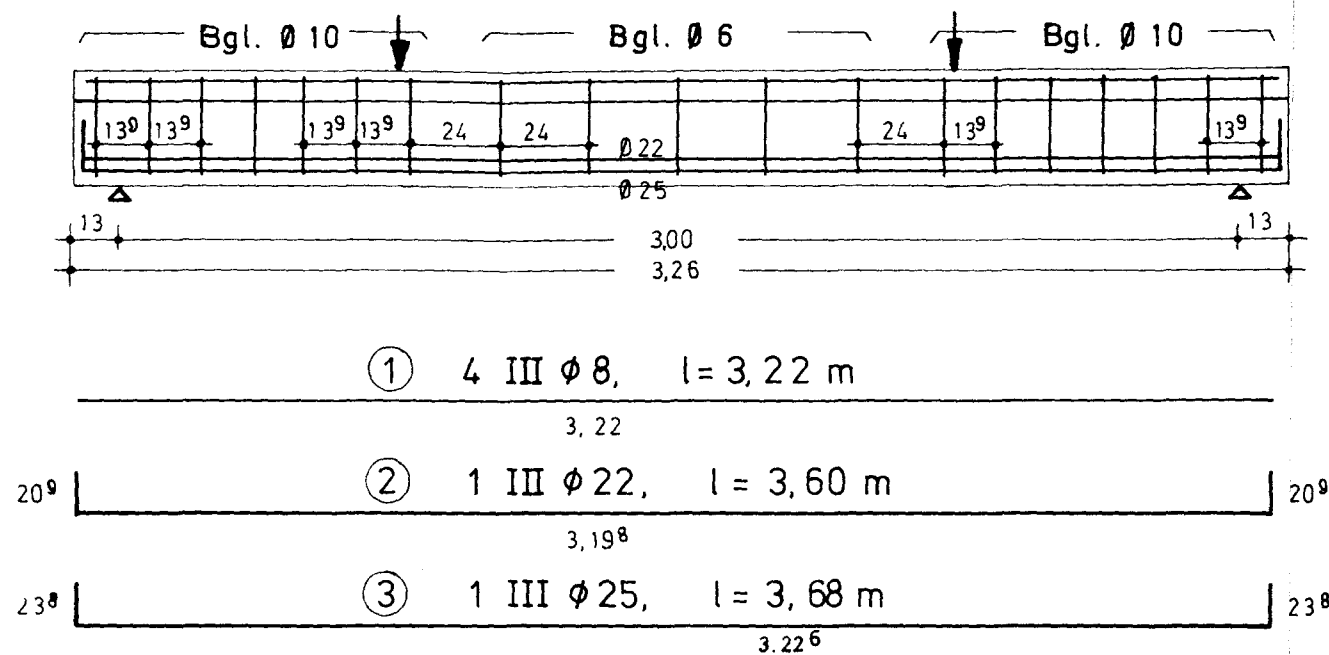
Nr.	Stck.	Ø	l	III 6	III 8	III 18	III 20
1	4	8	3,18		12,72		
2	1	18	3,42			3,42	
3	1	20	3,54				3,54
4	23	6	0,76	17,48			
5	23	8	0,28		6,44		
m:				17,48	19,16	3,42	3,54
kg:				4	8	7	9

28 kg St 42/50 RK

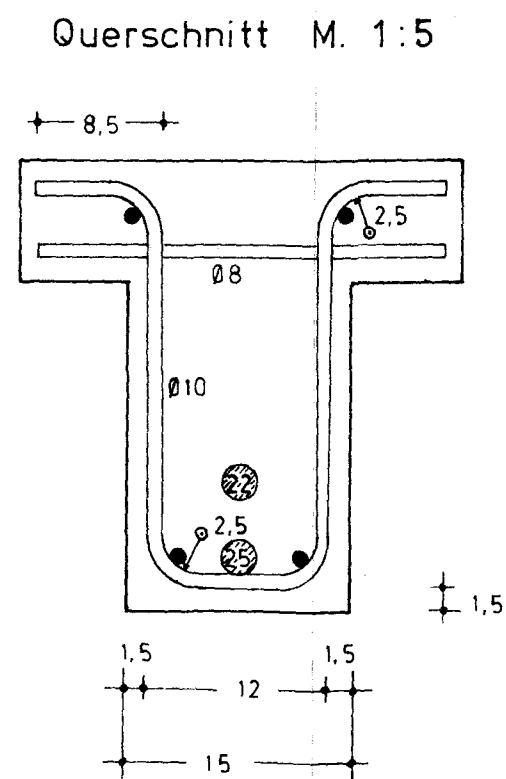
Biegerollendurchmesser der Bügel : 5 d

Bn 250 / St.42/50 RK

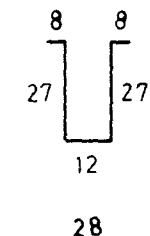
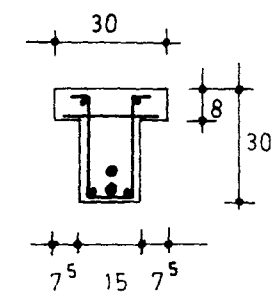
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 1
Bewehrungsplan	Anlage 1.1
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig	



Biegerollendurchmesser der Längsbewehrung: 7d



Biegerollendurchmesser der Bügel: 5d



- ④ 14 III Ø 10,  $l = 0,82$  m
- ⑤ 5 III Ø 6,  $l = 0,82$  m
- ⑥ 9 III Ø 8,  $l = 0,28$  m

### Stahlliste:

Nr.	Stck.	Ø	l	III 5	III 8	III 10	III 22	III 25
1	4	8	3,22		12,88			
2	1	22	3,60				3,60	
3	1	25	3,68					3,68
4	14	10	0,82			11,48		
5	5	6	0,82	4,10				
6	19	8	0,28		5,32			
m:				4,10	18,20	11,50	3,60	3,70
kg:				1	7	7	11	15

41 kg St 42/50 RK

Bn 250 / St. 42/50 RK

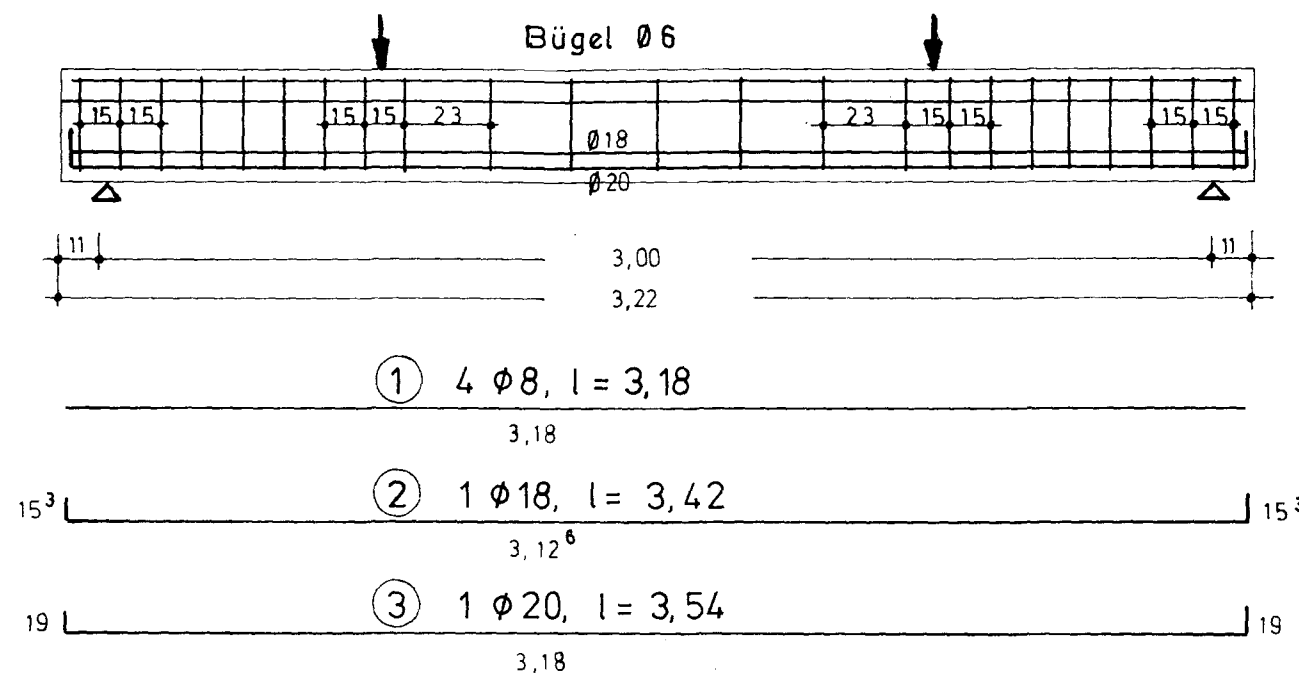
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 2

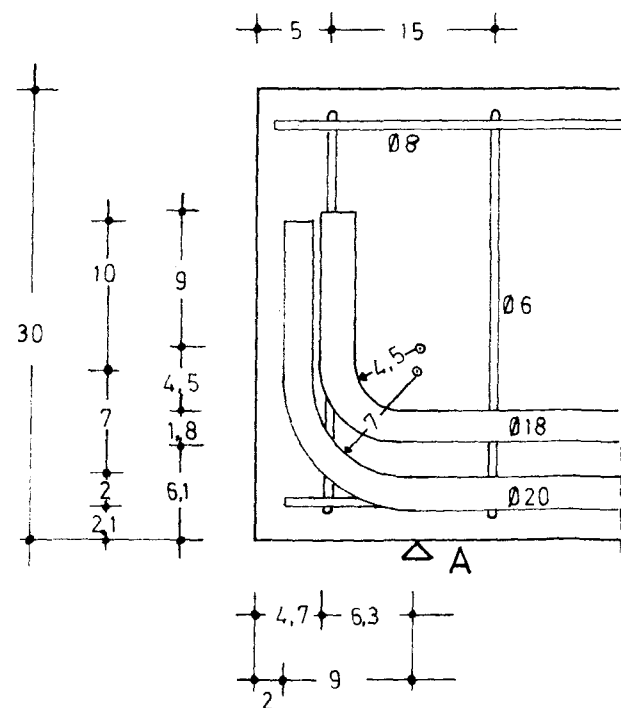
Bewehrungsplan

Anlage 1.2

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig

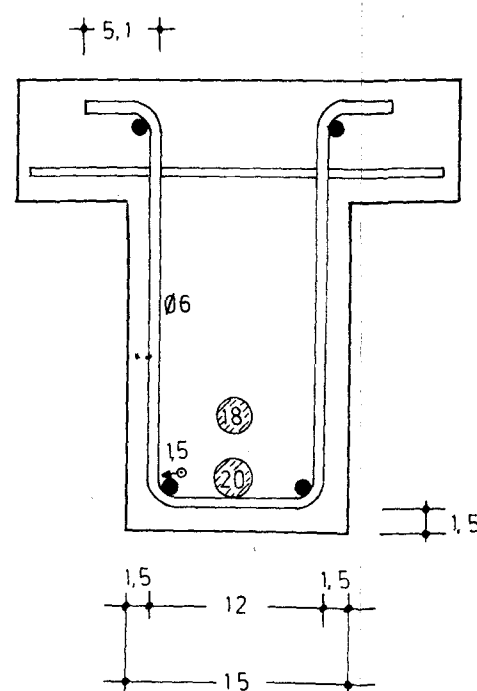


Auflager M. 1:5



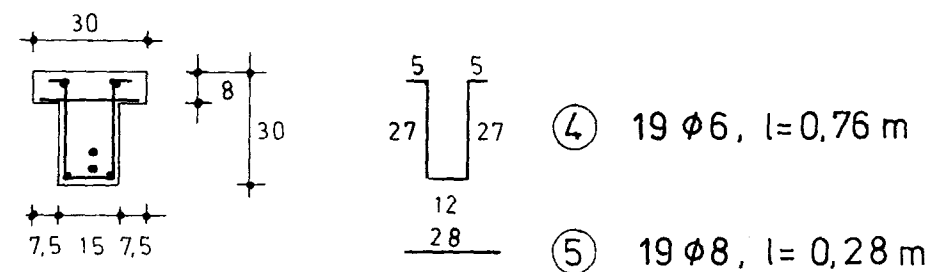
Biegerollendurchmesser  $\emptyset 18 \rightarrow 5d$   
 $\emptyset 20 \rightarrow 7d$

Querschnitt M. 1:5



Biegerollendurchmesser der Bügel: 5d

Bn 350 / St.42/50 RK



Stahlliste:

Nr.	Stck.	Ø	l	III 6	III 8	III 18	III 20
1	4	8	3,18	12,72			
2	1	18	3,42	3,42			
3	1	20	3,54	3,54			
4	19	6	0,76	14,44			
5	19	8	0,28	5,52			
m:				14,44	18,24	3,42	3,54
kg:				4	8	7	9

28 kg St 42/50 RK

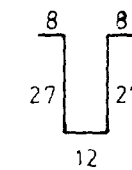
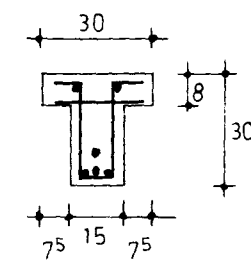
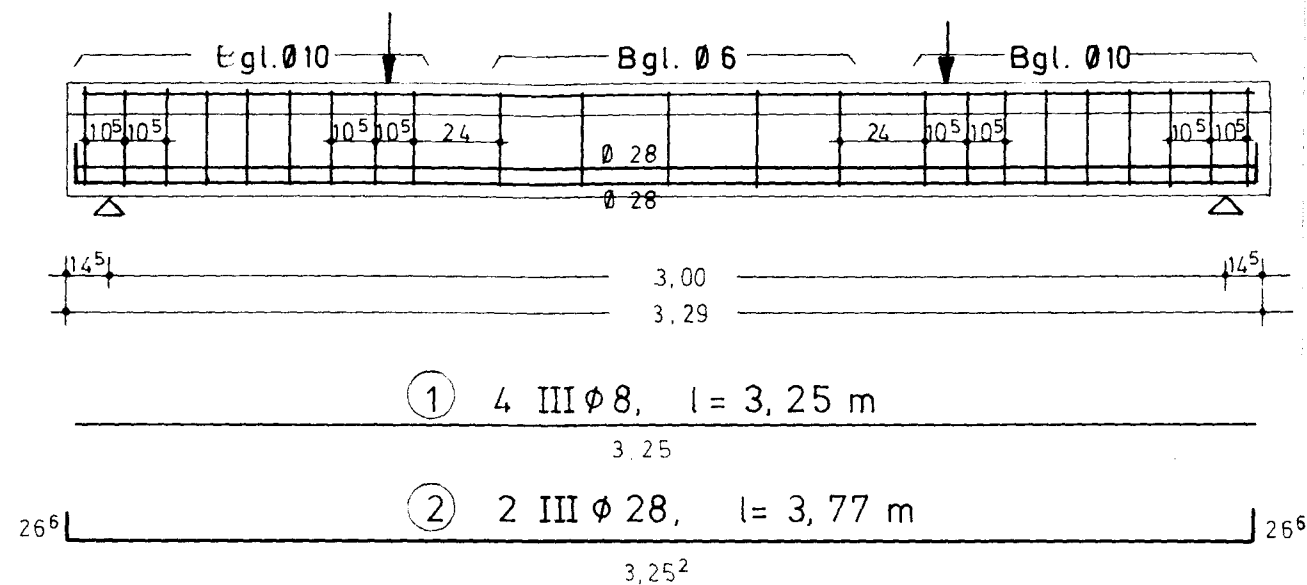
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 3

Bewehrungsplan

Anlage 1.3

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
 Technische Universität Braunschweig

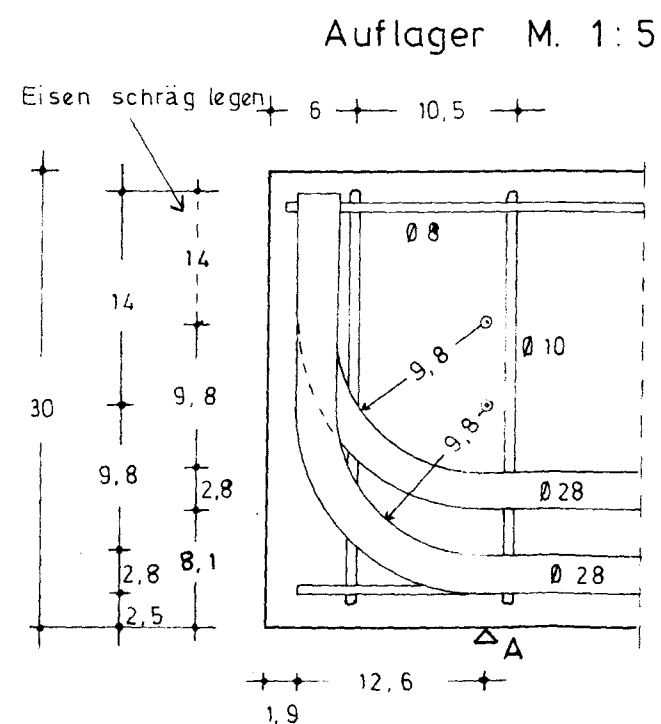


- ③ 18 III Ø 10,  $l = 0,82$  m
- ④ 5 III Ø 6,  $l = 0,82$  m
- ⑤ 23 III Ø 8,  $l = 0,28$  m

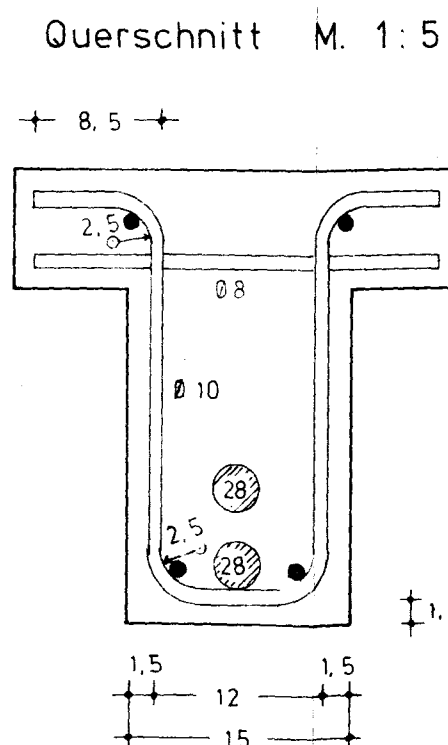
#### Stahlliste:

Nr.	Stck.	Ø	l	III 6	III 8	III 10	III 28
1	4	8	3,25		13,00		
2	2	28	3,77				7,54
3	18	10	0,82			14,74	
4	5	6	0,82	4,10			
5	23	8	0,28		6,44		
m:				4,10	19,44	14,74	7,54
kg:				1	8	9	36

54 kg St 42/50 RK



Biegerollendurchmesser  
der Längsbewehrung: 7d



Biegerollendurchmesser der Bügel: 5d

Bn 350 / St. 42/50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

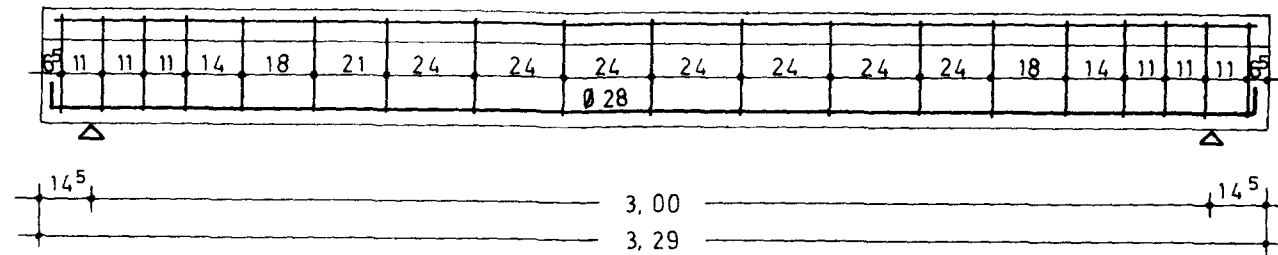
Balken 4

Bewehrungsplan

Anlage 1.4

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig

Bgl. Ø 6



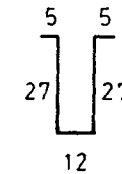
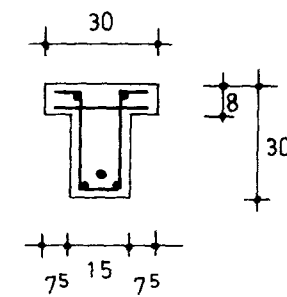
① 4 III Ø 8, l = 3,25 m

3,25

② 1 III Ø 28, l = 3,77 m

3,25

26<sup>6</sup>



③ 19 III Ø 6, l = 0,76 m

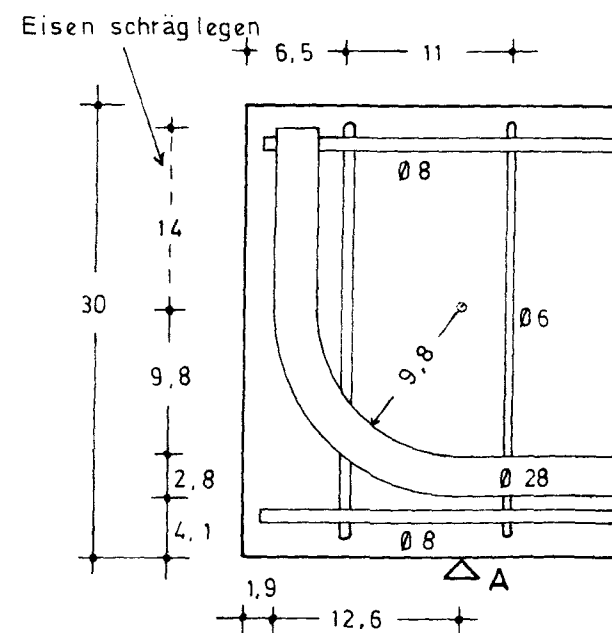
④ 19 III Ø 8, l = 0,28 m

### Stahlliste:

Nr.	Stck.	Ø	l	III 6	III 8	III 28
1	4	8	3,25		13,00	
2	1	28	3,77			3,77
3	19	6	0,76	14,44		
4	19	8	0,28		5,32	
m:				14,44	18,32	3,77
kg:				4	7	18

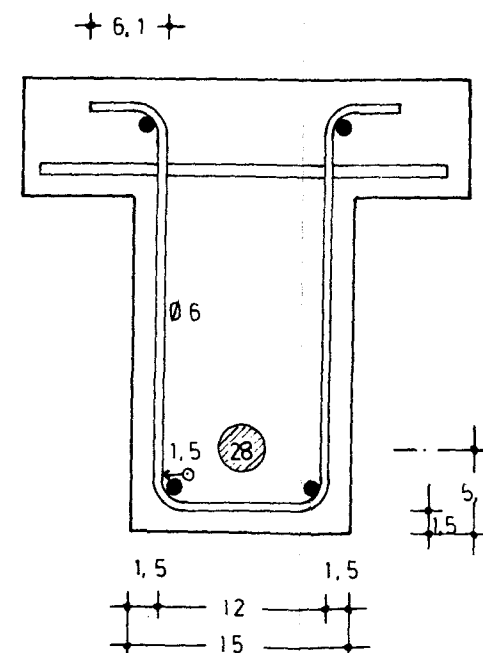
29 kg St 42/50 RK

Auflager M. 1:5



Biegerollendurchmesser  
der Längsbewehrung: 7d

Querschnitt M. 1:5



Biegerollendurchmesser der Bügel: 5d

Bn 250/St. 42/50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

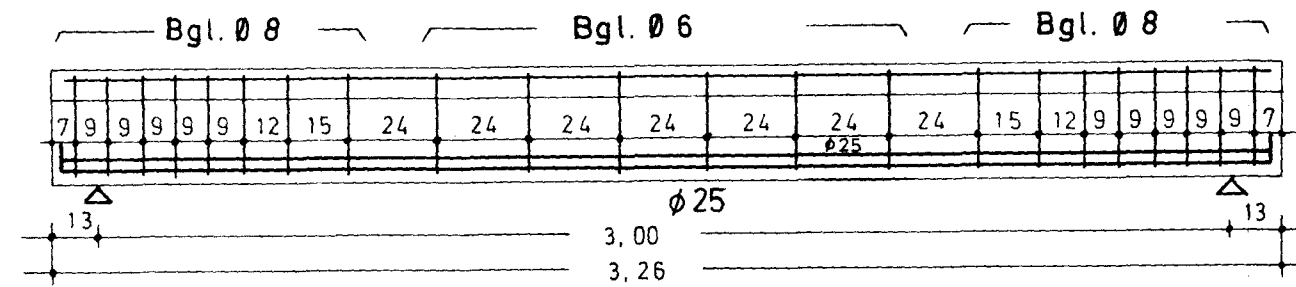
Balken 5

Bewehrungsplan

Anlage 1.5

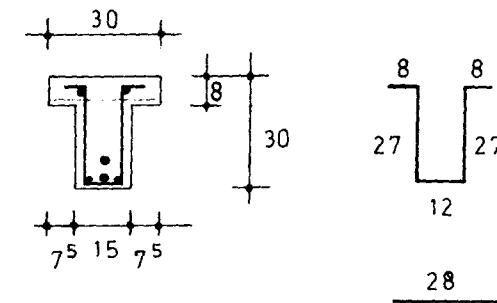
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig





① 4 III Ø 8, l = 3,22 m

② 2 III Ø 25, l = 3,68 m



③ 16 III Ø 8, l = 0,82 m

④ 6 III Ø 6, l = 0,82 m

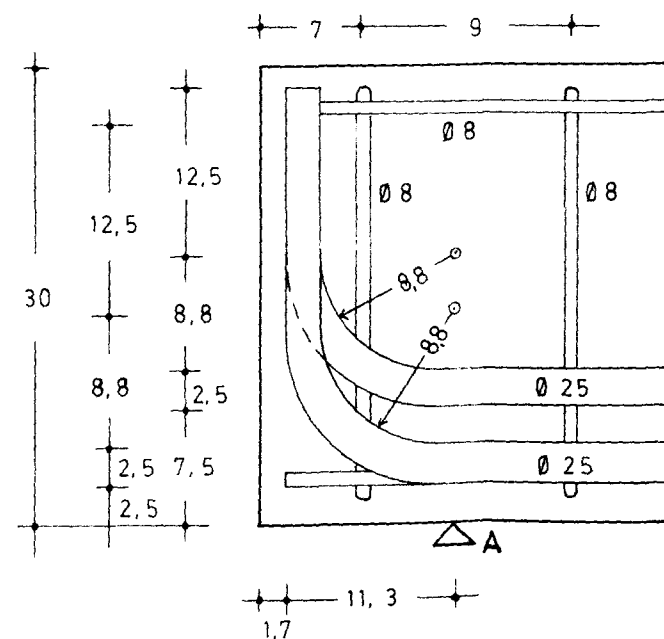
⑤ 22 III Ø 8, l = 0,28 m

### Stahlliste:

Nr.	Stck.	Ø	l	III 6	III 8	III 25
1	4	8	3,22		12,88	
2	2	25	3,68			7,36
3	16	8	0,82		13,12	
4	6	6	0,82	4,92		
5	22	8	0,28		6,16	
m:				4,92	22,16	7,36
kg:				1	9	29

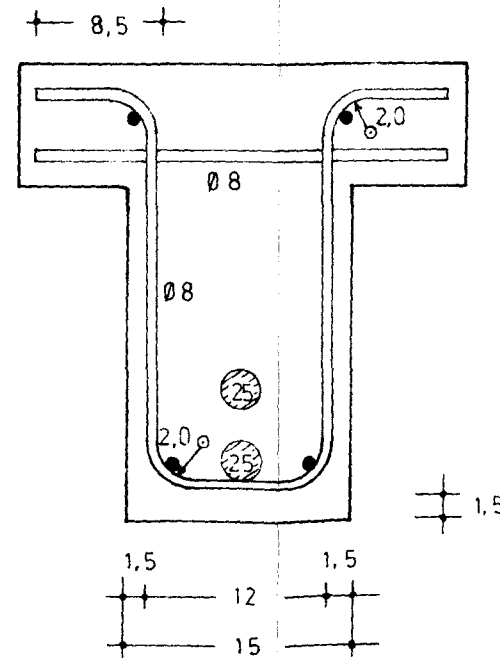
39 kg St 42/50 RK

Auflager M. 1:5



Biegerollendurchmesser der Längsbewehrung: 7d

Querschnitt M. 1:5



Biegerollendurchmesser der Bügel: 5d

Bn 250/St. 42/50 RK

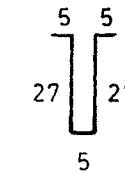
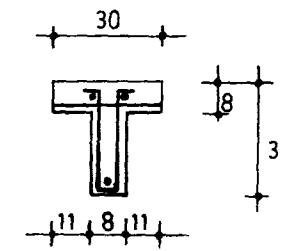
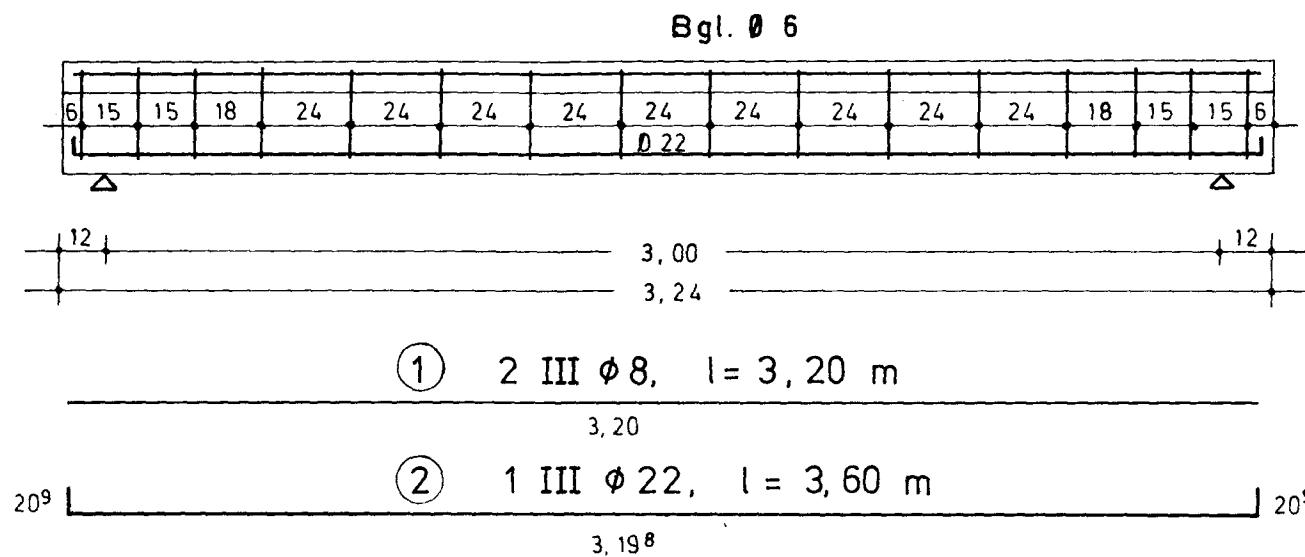
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 6

Bewehrungsplan

Anlage 1.6

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig



③ 16 III Ø 6, l = 0,69 m

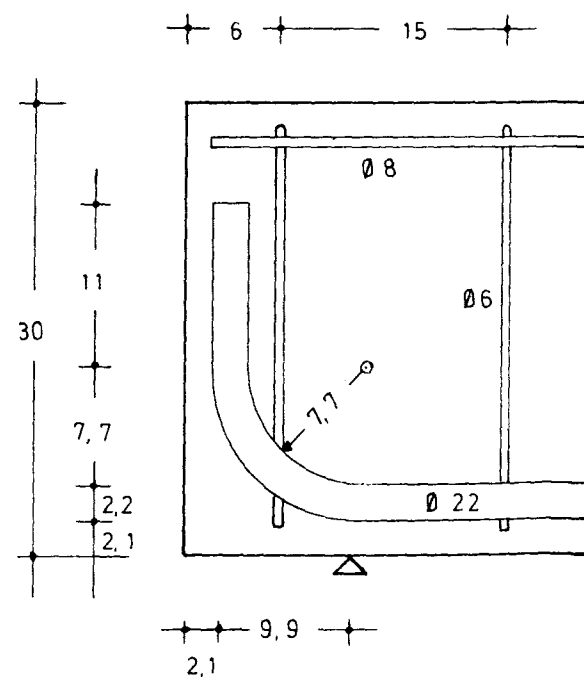
④ 16 III Ø 8, l = 0,28 m

### Stahlliste:

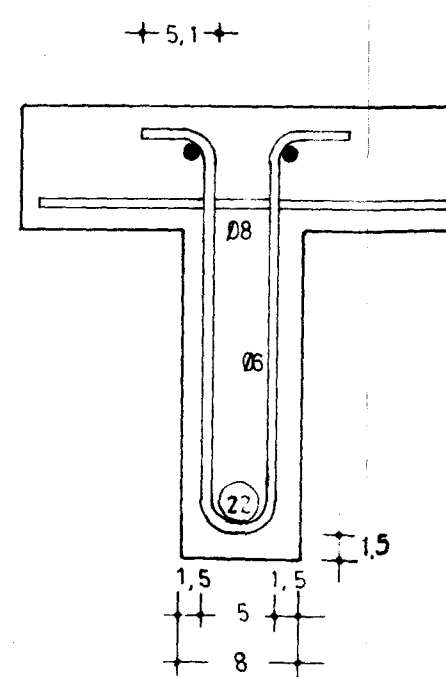
Nr.	Stück.	Ø	l	III 6	III 8	III 22
1	2	8	3,20		6,40	
2	1	22	3,60			3,60
3	16	6	0,69	11,04		
4	16	8	0,28		4,48	
m:				11,04	10,88	3,60
kg:				3	5	11

19 kg St 42/50

### Auflager M. 1:5



### Querschnitt M. 1:5



Bn 250 / St. 42/50 RK

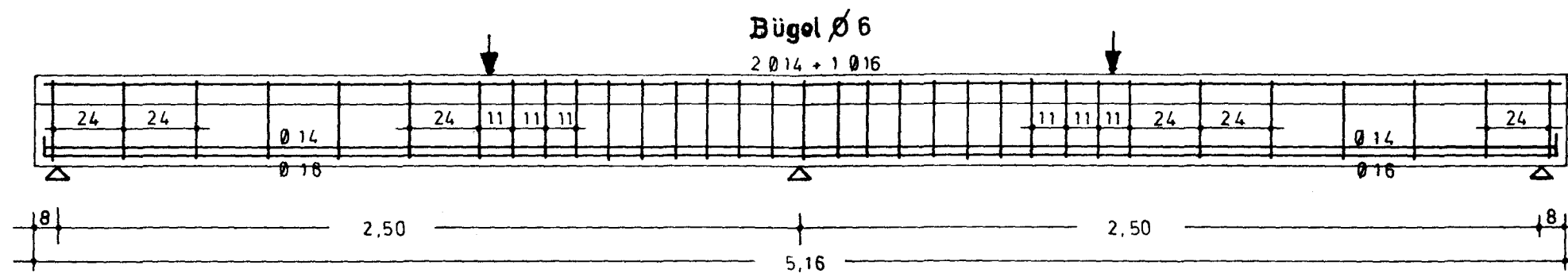
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 7

Bewehrungsplan

Anlage 1.7

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig



① 1 III Ø 14, l = 3,90 m

② 1 III Ø 14, l = 4,50 m

③ 1 III Ø 16, l = 5,12 m

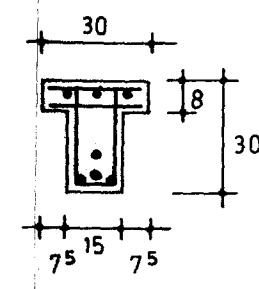
④ 2 x 1 III Ø 14, l = 2,67 m

④ ( 1 III Ø 14 )

⑤ 2 x 1 III Ø 16, l = 2,71 m

⑤ ( 1 III Ø 16 )

⑥ 2 III Ø 8, l = 5,12 m



⑦ 33 III Ø 6, l = 0,76 m

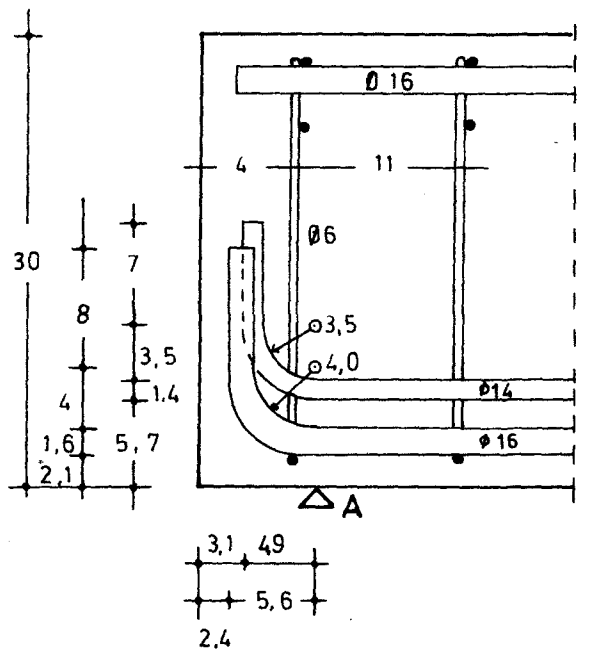
⑧ 2 x 33 = 66 III Ø 8, l = 0,28 m

**Stahlliste:**

Nr.	Stck.	Ø	l	III 6	III 8	III 14	III 16
1	1	14	3,90			3,90	
2	1	14	4,50			4,50	
3	1	16	5,12				5,12
4	2	14	2,67			5,34	
5	2	16	2,71				5,42
6	2	8	5,12		10,24		
7	33	6	0,76	25,18			
8	66	8	0,28		18,48		
m:				25,18	28,72	13,74	10,54
kg:				6	12	17	17

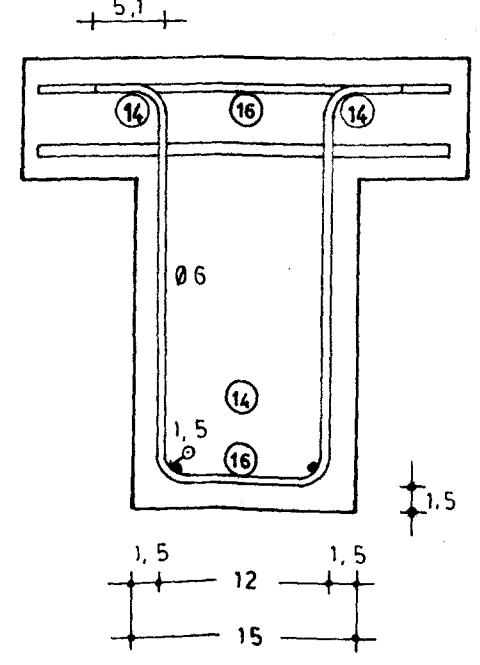
52 kg St 42/50 RK

Endauflager M. 1:5



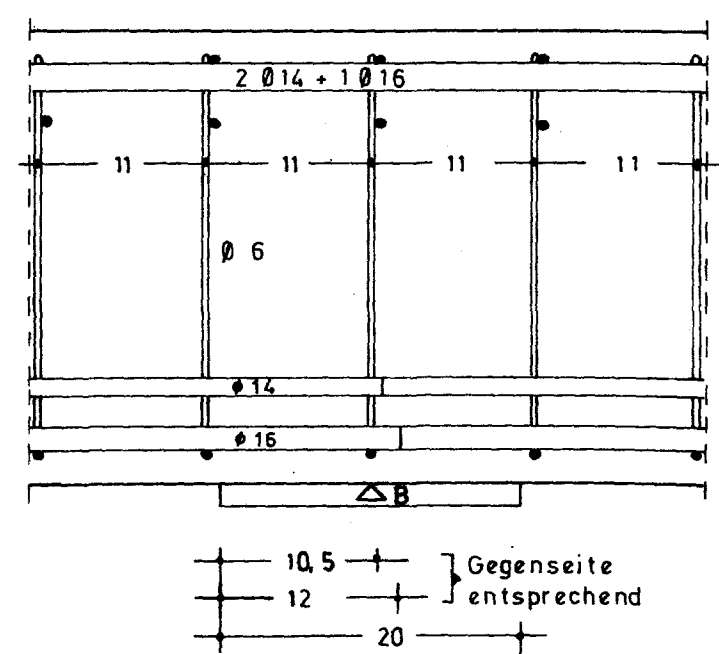
Biegerollendurchmesser der Längsbewehrung: 5d

Querschnitt M. 1:5



Biegerollendurchmesser der Bügel: 5d

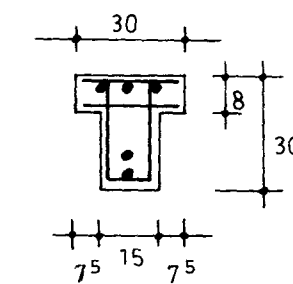
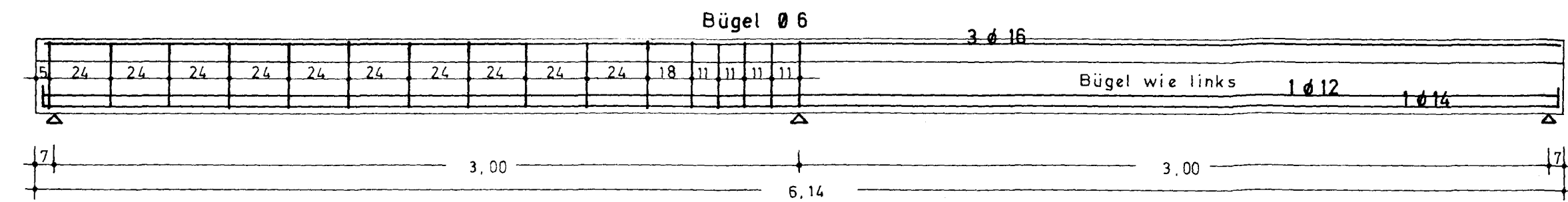
Mittelaufleger M. 1:5



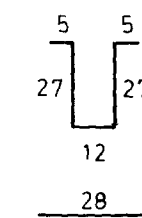
Überstand der Längsbewehrung über Vorderkante Auflager: 7,5 d

Bn 250 / St.42/50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 8
Bewehrungsplan	Anlage 1.8
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig	



- ① 1 III Ø 16, l = 4,34 m  
4,34
- ② 1 III Ø 16, l = 4,84 m  
4,84
- ③ 1 III Ø 16, l = 6,10 m  
6,10
- ④ 2x1 III Ø 12, l = 3,13 m  
3,03<sup>2</sup>
- ⑤ 2x1 III Ø 14, l = 3,17 m  
3,05<sup>4</sup>
- ④ (1 III Ø 12)
- ⑤ (1 III Ø 14)
- ⑥ 2 III Ø 8, l = 6,10 m  
6,10



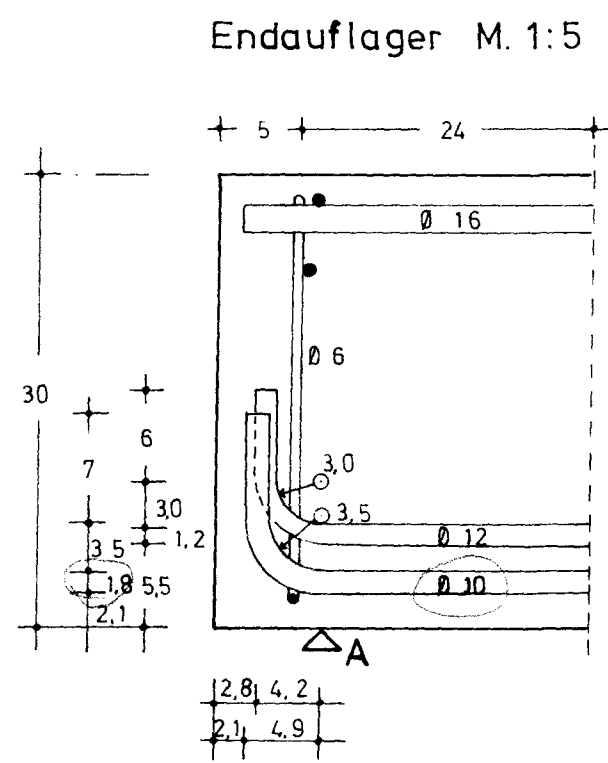
- ⑦ 31 III Ø 6, l = 0,76 m
- ⑧ 2x31 = 62 III Ø 8, l = 0,28 m

Stahlliste:

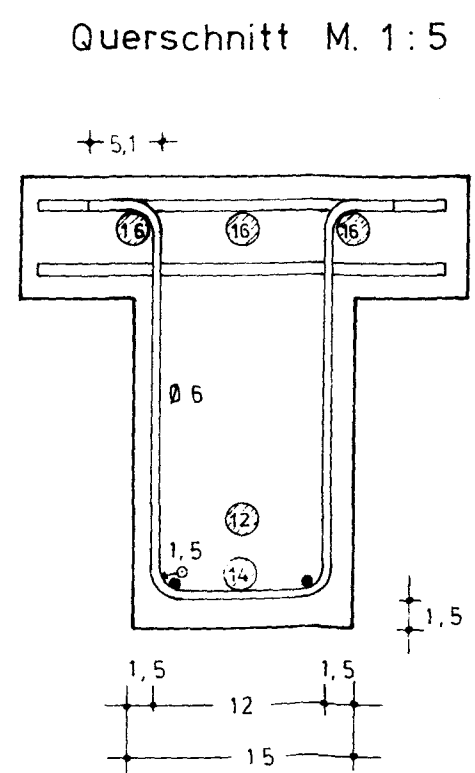
Nr.	Stück.	Ø	l	III 6	III 8	III 12	III 14	III 16
1	1	16	4,34					4,34
2	1	16	4,84					4,84
3	1	16	6,10					6,10
4	2	12	3,13			6,26		
5	2	14	3,17				6,34	
6	2	8	6,10		12,20			
7	31	6	0,76	23,56				
8	62	8	0,28		17,36			
m:				23,56	29,56	6,26	6,34	15,28
kg:				6	12	6	8	24

56 kg St 42/50 RK

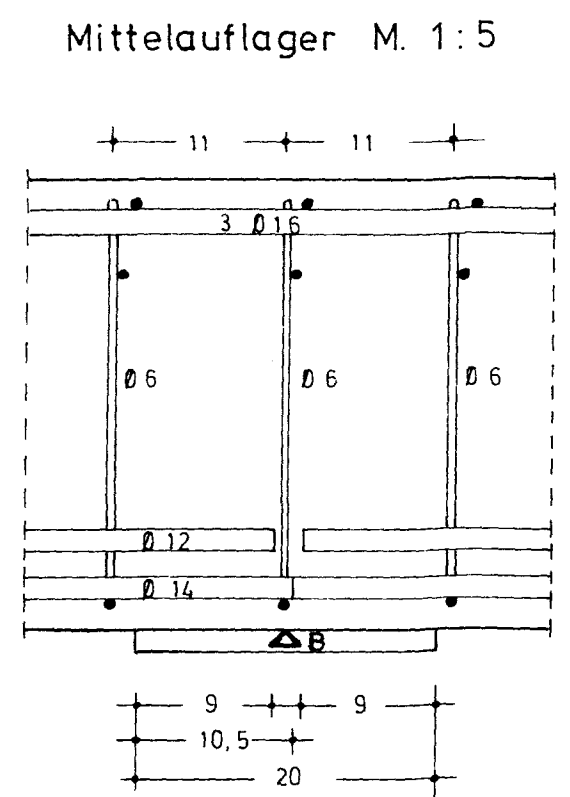
Bn 250/ St. 42/50 RK



Biegerollendurchmesser der Längsbewehrung: 5d

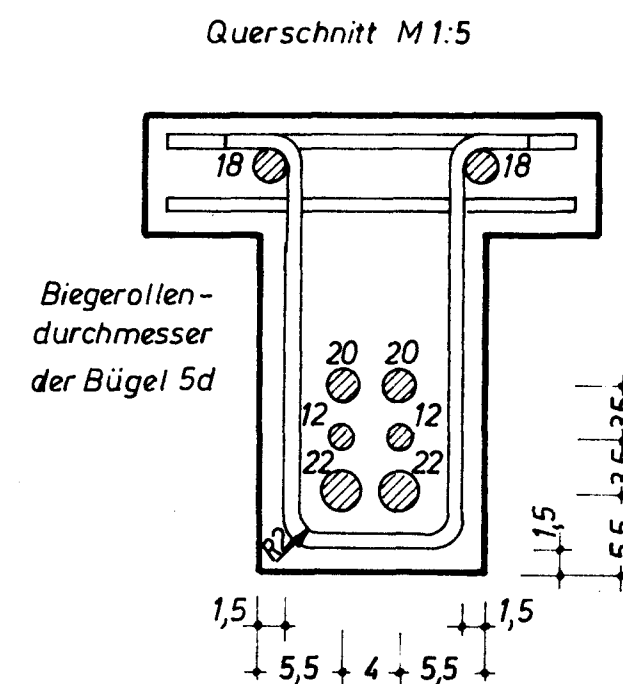
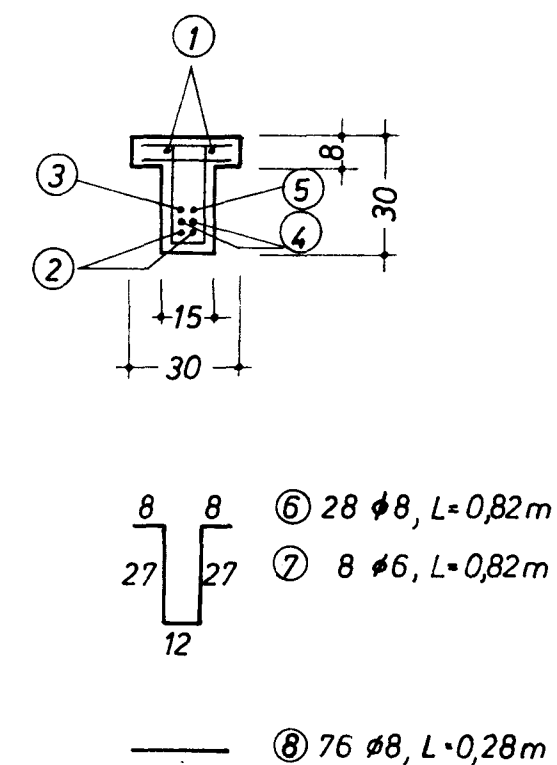
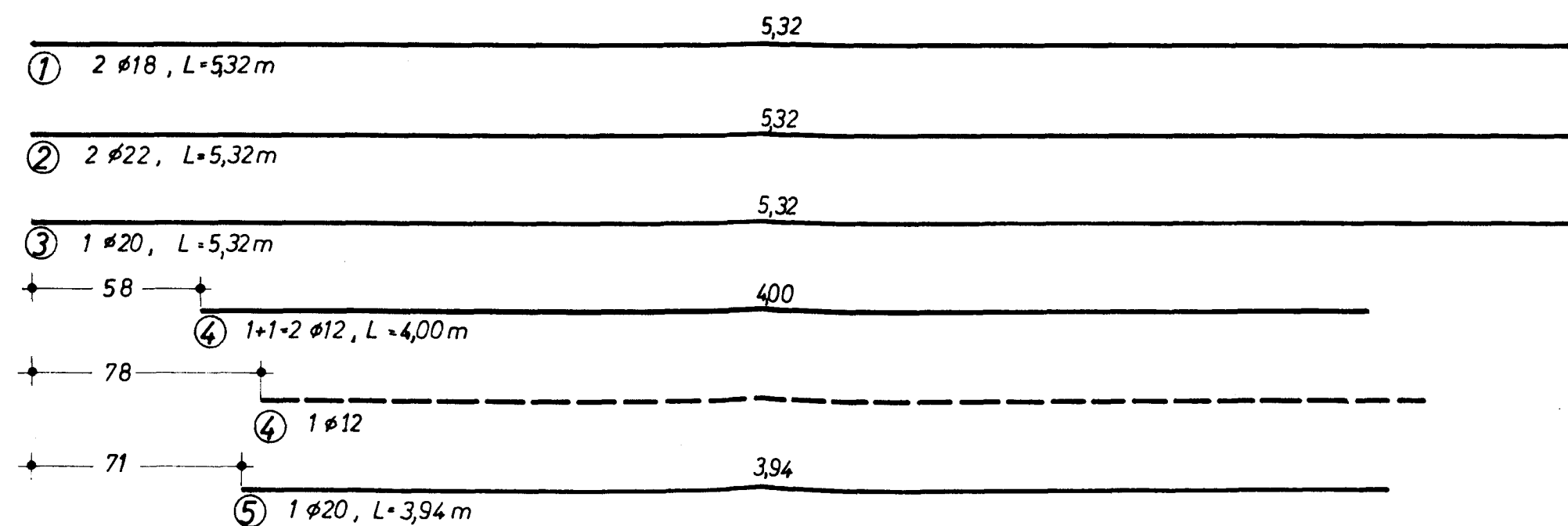
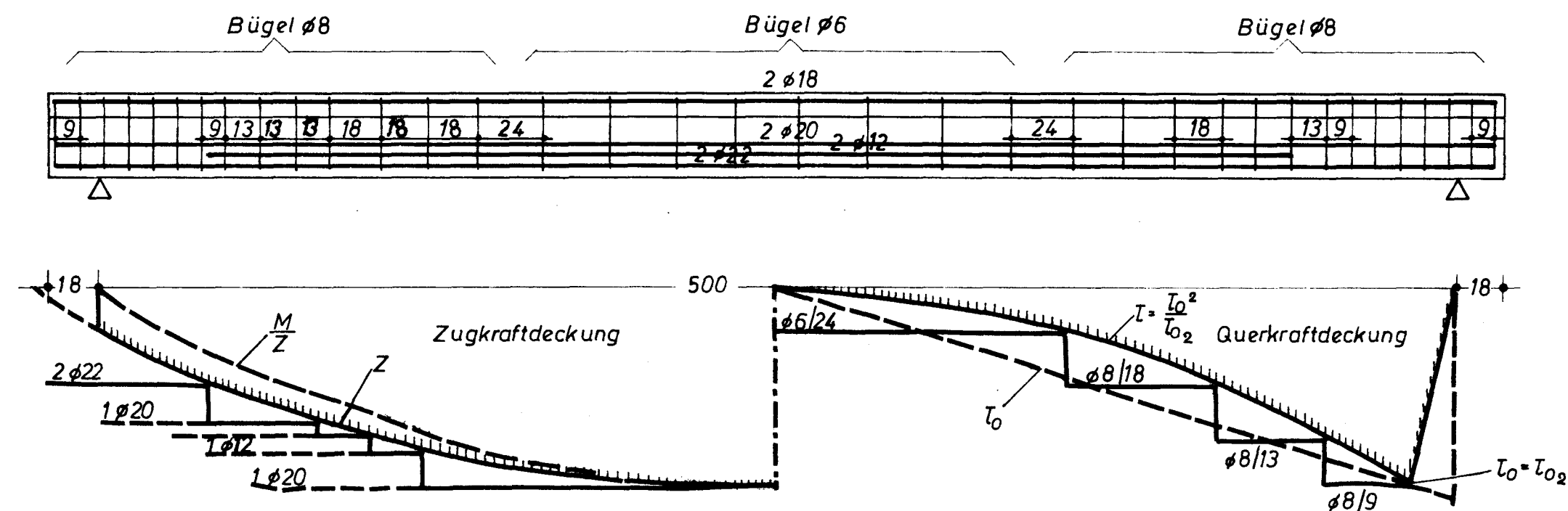


Biegerollendurchmesser der Bügel: 5d



Überstand der Längsbewehrung über Vorderkante Auflager: 7,5d

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 9
Bewehrungsplan	Anlage 1.9
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig	



# **Stahlliste:**

Nr.	Stck.	Ø	L	I 6	I 8	III 12	III 18	III 20	III 22
1	2	III 18	5,32				10,64		
2	2	III 22	"						10,64
3	1	III 20	"					5,32	
4	2	III 12	4,00			8,00			
5	1	III 20	3,94					3,94	
6	28	I 8	0,82		22,96				
7	8	I 6	"	6,56					
8	76	I 8	0,28		21,28				
m:				6,56	44,24	8,00	10,64	9,26	10,64
kg:				1,01	17,47	7,10	21,28	22,87	31,71

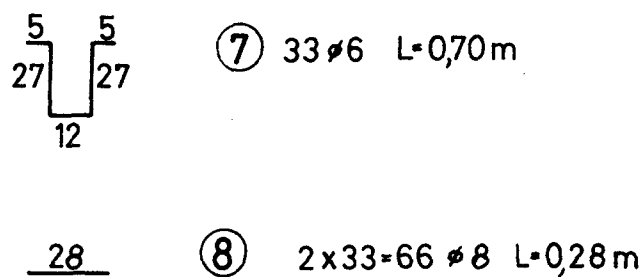
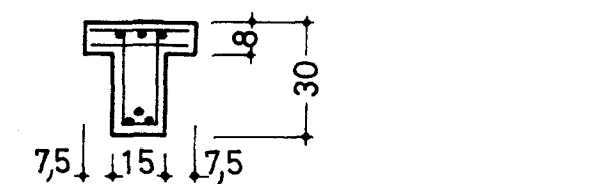
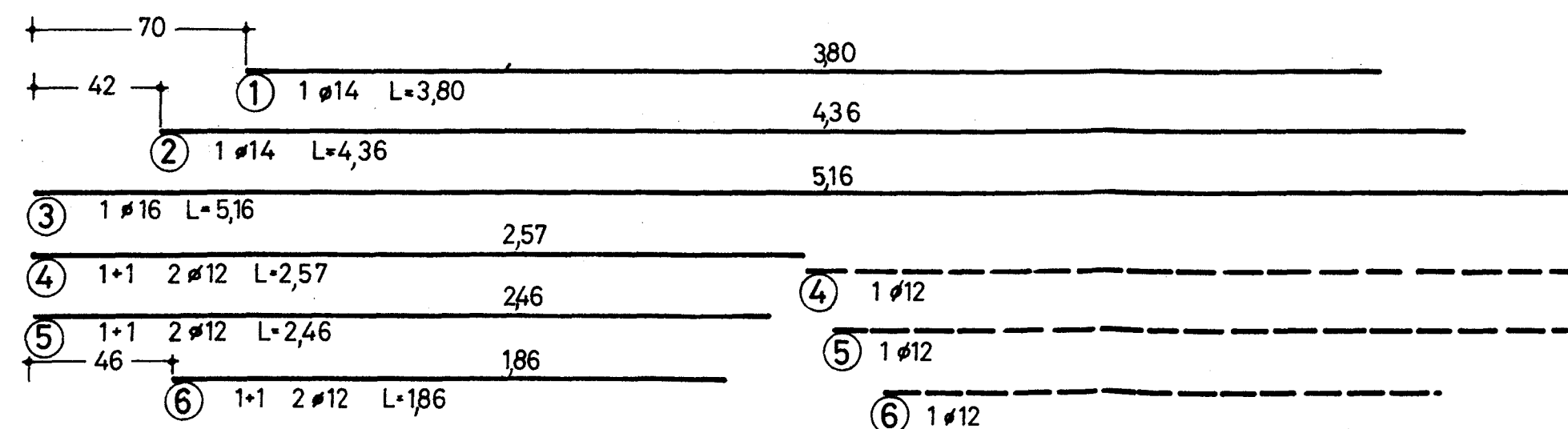
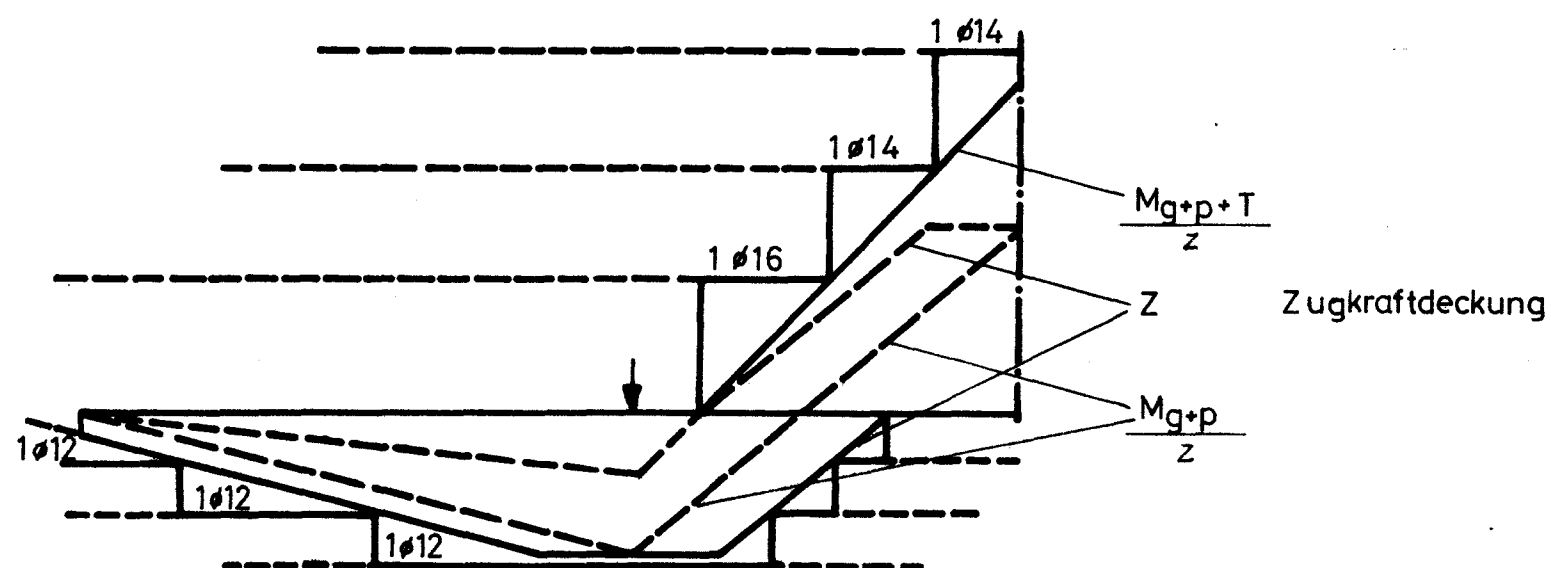
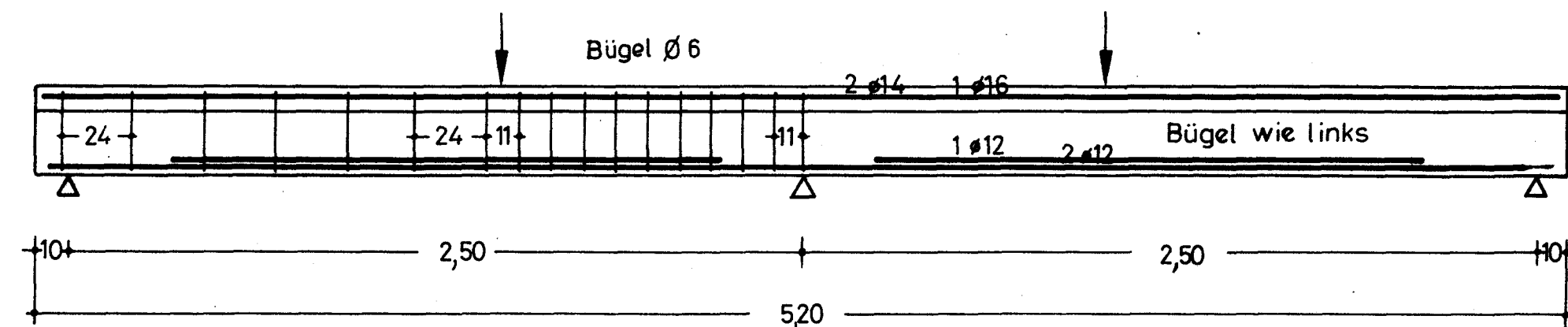
18,48 kg St. I

82,96 kg St. III

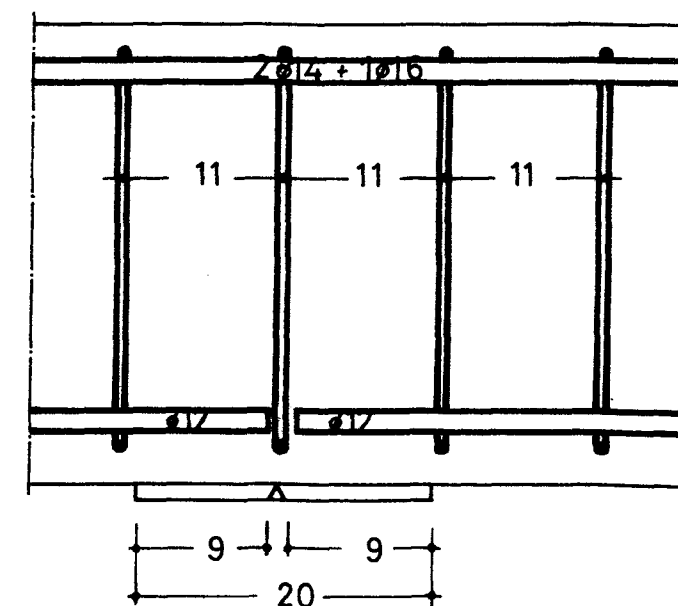
Bn 250 / St. 42/50 RK

<p>Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer</p>	<p>Balken 10</p>
<p>Bewehrungsplan</p>	<p>Anlage 1.10</p>
<p>Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig</p>	



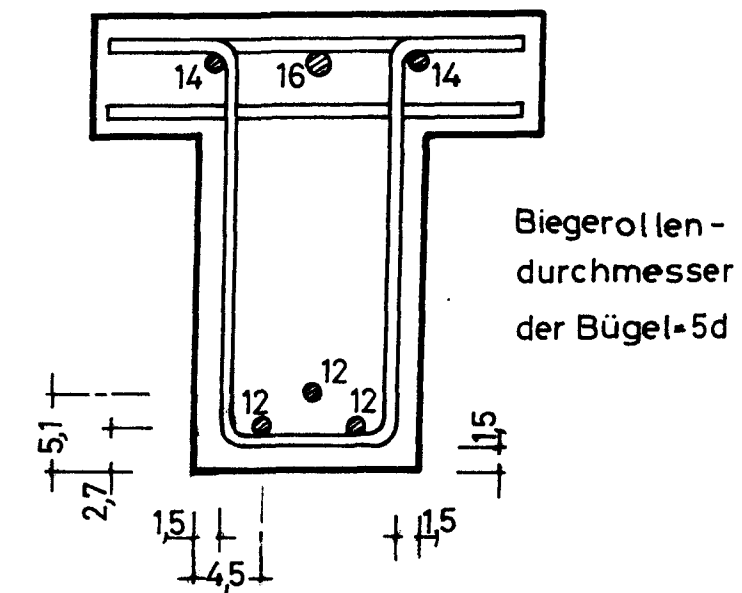


Mittelaufleger



Überstand der Längsbewehrung über Vorderkante Auflager=7,5d

Querschnitt M 1:5



Stahlliste:

Nr	Stck.	Ø	L	III 6	III 8	III 12	III 14	III 16
1	1	III 14	3,80				3,80	
2	1	III 14	4,36				4,36	
3	1	III 16	5,16					5,16
4	2	III 12	2,57			5,14		
5	2	III 12	2,46			4,92		
6	2	III 12	1,86			3,72		
7	33	III 6	0,70	23,10				
8	66	III 8	0,28		18,48			
				m	23,10	18,48	13,78	8,16
				kg	5,13	7,28	12,24	9,87
				4267 kg St.III				

Bn 250/ St.42/50 RK

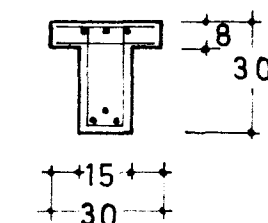
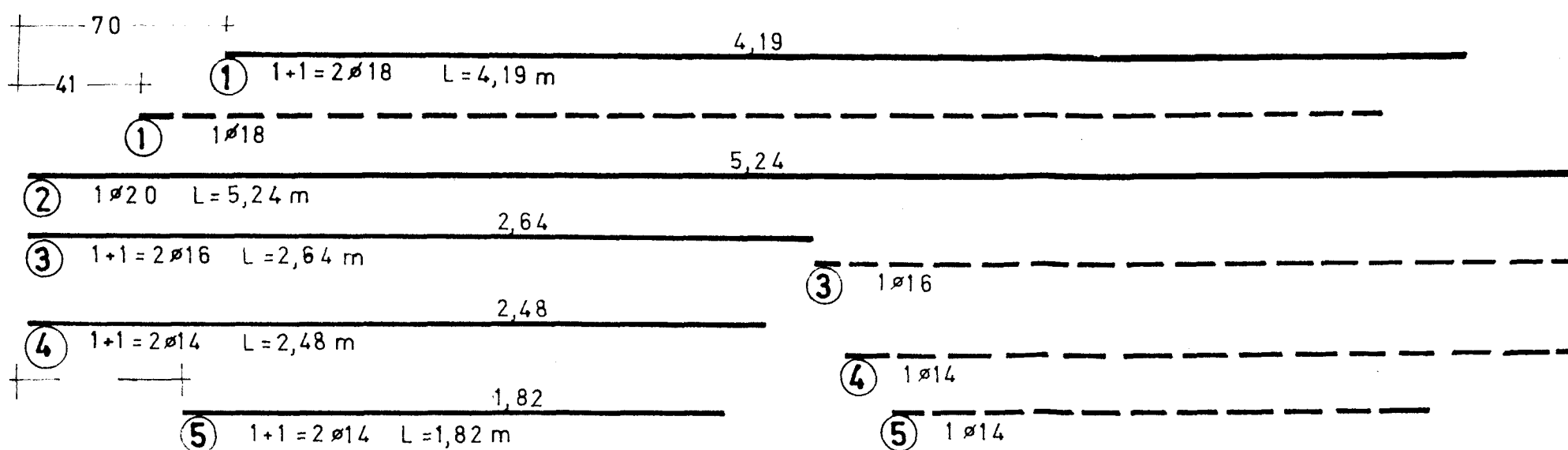
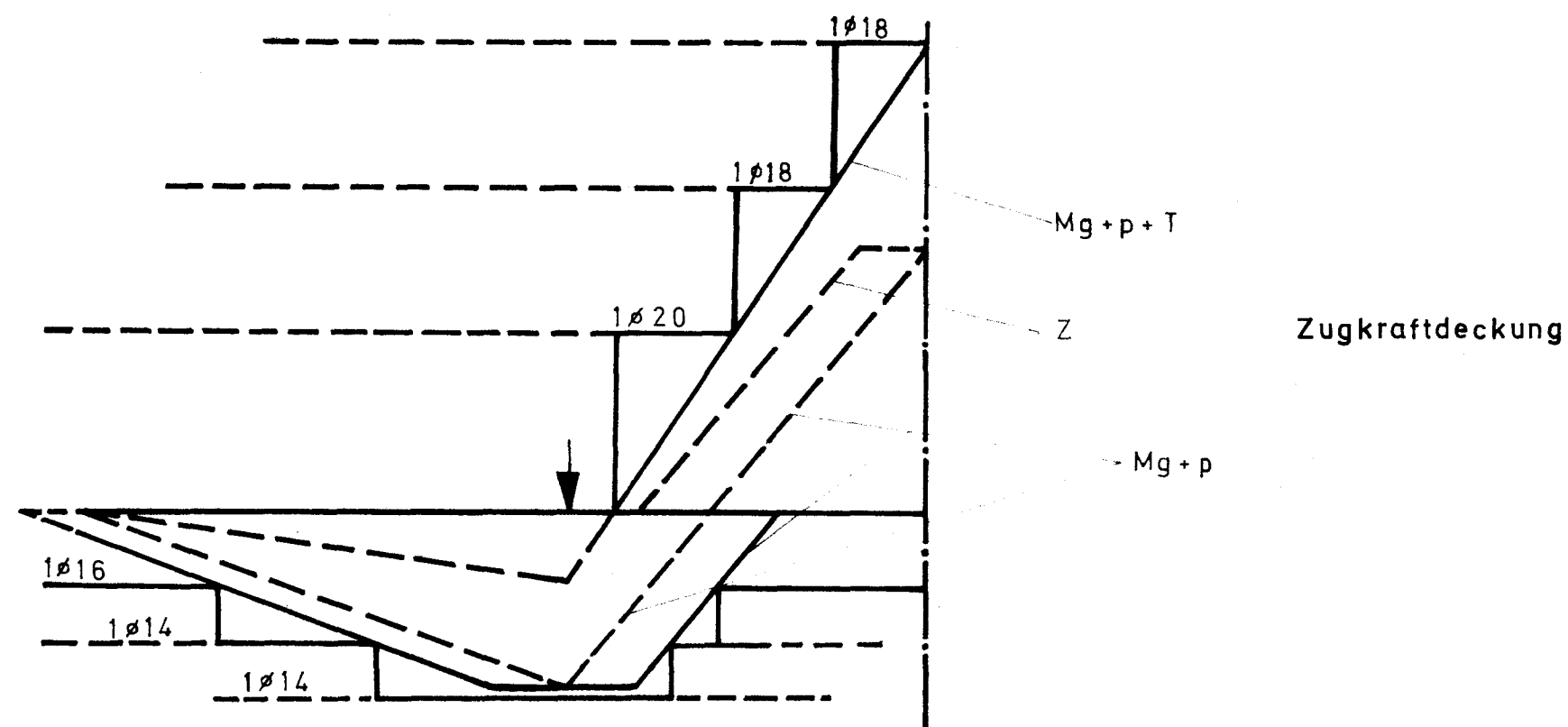
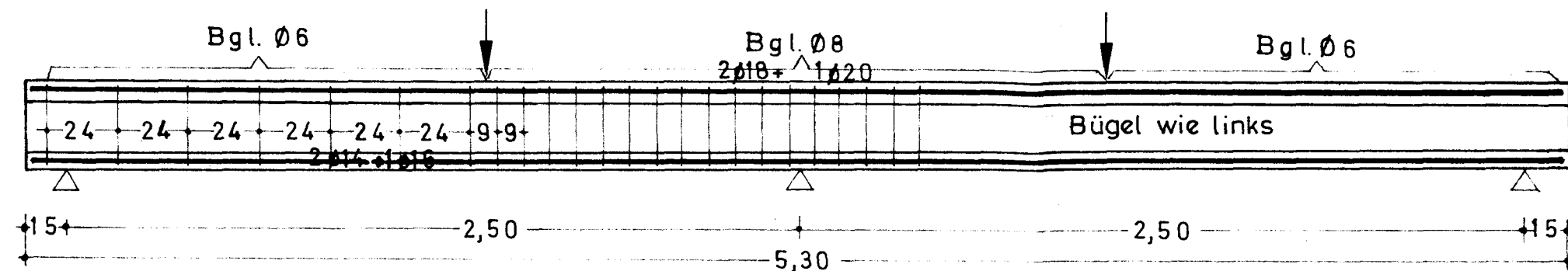
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 11

Bewehrungsplan

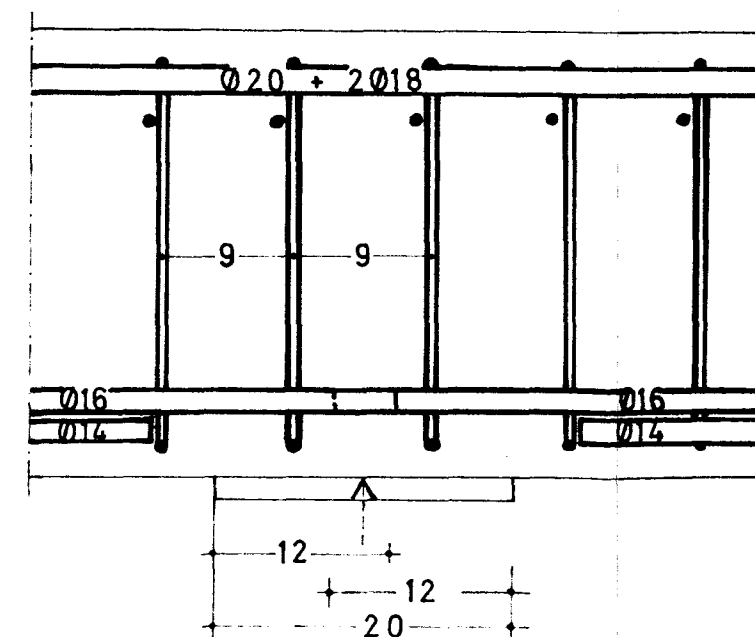
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig

Anlage 1.11



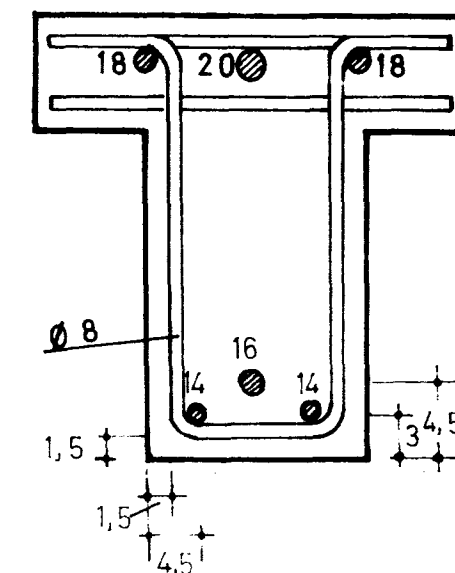
8	8	⑥	24 Ø8	L=0,82 m
27	27	⑦	14 Ø6	L=0,82 m
12				
28		⑧	38 Ø8	L=0,28 m

Mittelaufleger



Überstand der Längsbewehrung  
über Vorderkante Auflager = 7,5d

Querschnitt M1:5



Biegerollen-  
durchmesser  
der Bügel: 5d

Stahlliste:

Nr.	Stck.	Ø	L	6	8	14	16	18	20
1	2	18	4,19					8,38	
2	1	20	5,24						5,24
3	2	16	2,64				5,28		
4	2	14	2,48			4,96			
5	2	14	1,82			3,64			
6	24	8	0,82		19,68				
7	14	6	0,82	11,48					
8	38	8	0,28		10,64				
m:				11,48	30,32	8,60	5,28	8,38	5,24
kg:				3	12	10	8	17	13

63 kg St. III

Bn 250/ St. 42/ 50 RK

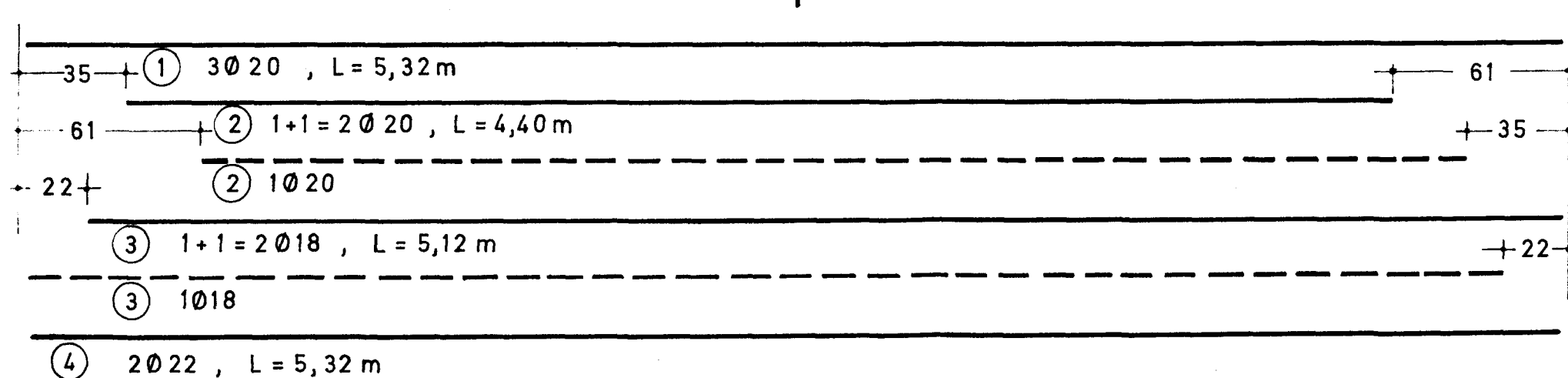
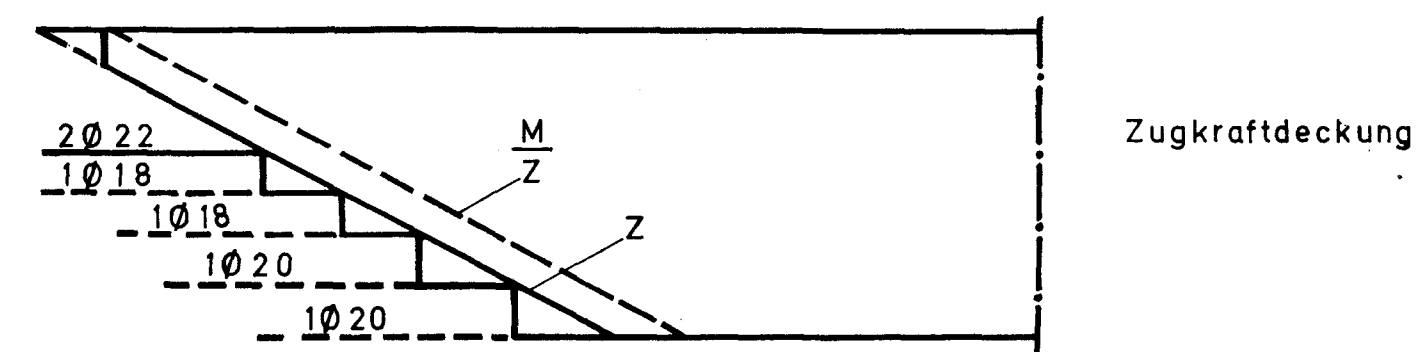
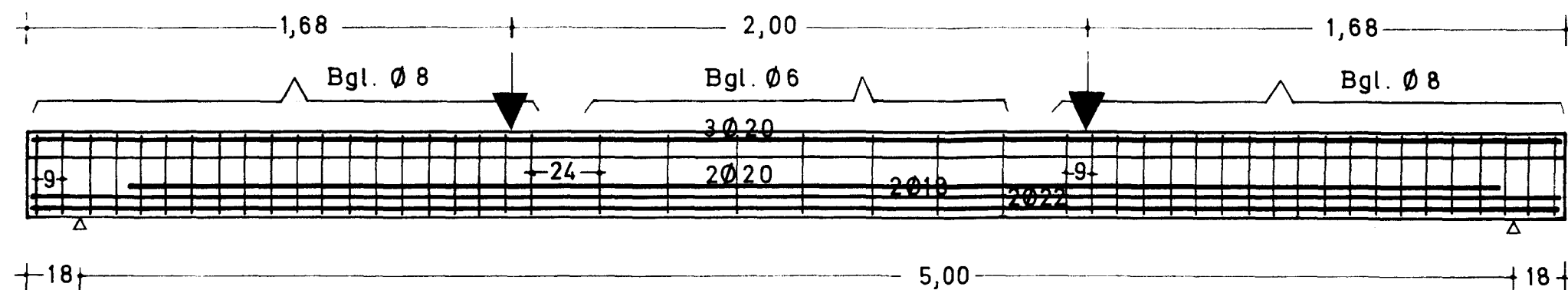
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 12

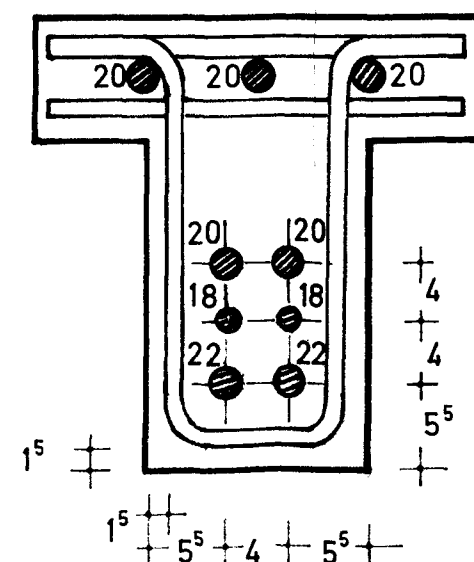
Bewehrungsplan

Anlage 1.12

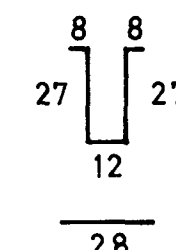
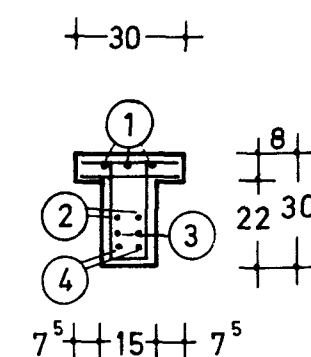
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig



Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d



Querschnitt M 1:5



- ⑤ 40 Ø 8, L = 0,82 m
- ⑥ 7 Ø 6, L = 0,82 m
- ⑦ 94 Ø 8, L = 0,28 m

### Stahlliste

Nr.	Stck.	Ø	L	6	8	18	20	22
1	3	20	5,32				15,96	
2	2	20	4,40				8,80	
3	2	18	5,12			10,24		
4	2	22	5,32					10,64
5	40	8	0,82		32,80			
6	7	6	0,82	5,74				
7	94	8	0,28		26,32			
m				5,74	59,12	10,24	24,76	10,64
kg				2	24	21	62	32

141 kg St. 42/50 RK

Bn 250/ St. 42/50 RK

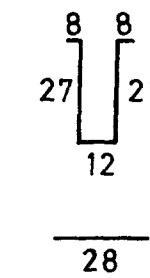
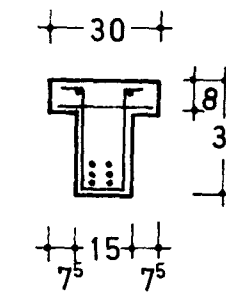
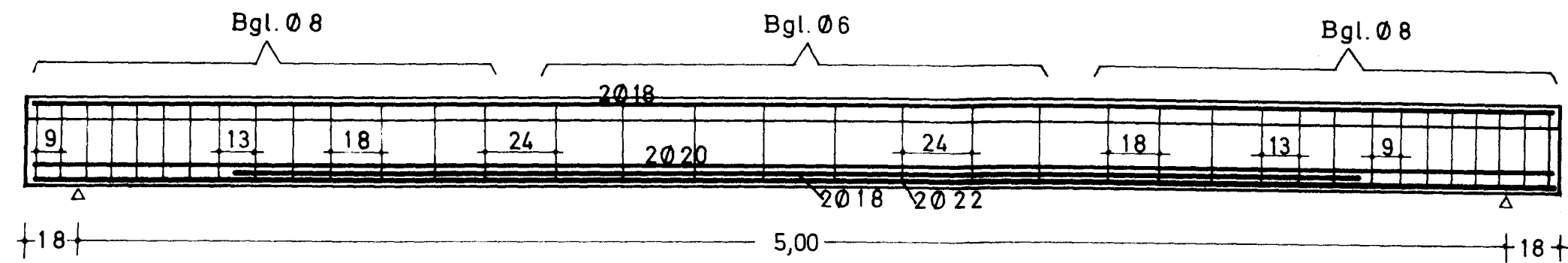
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 13

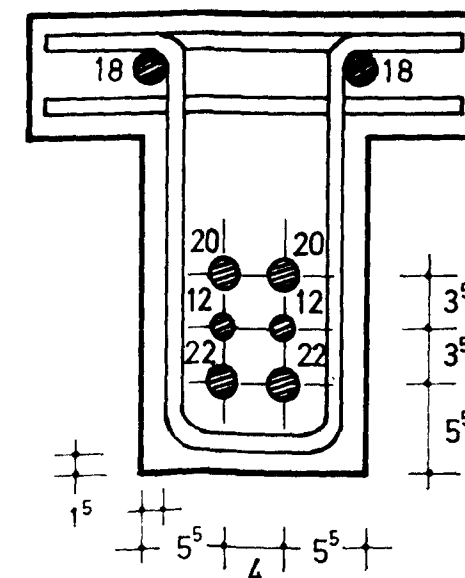
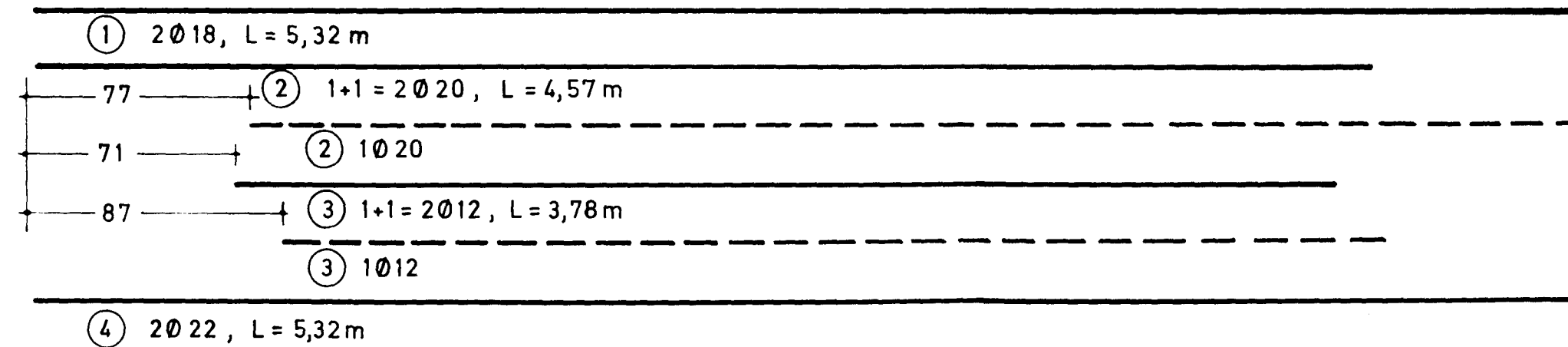
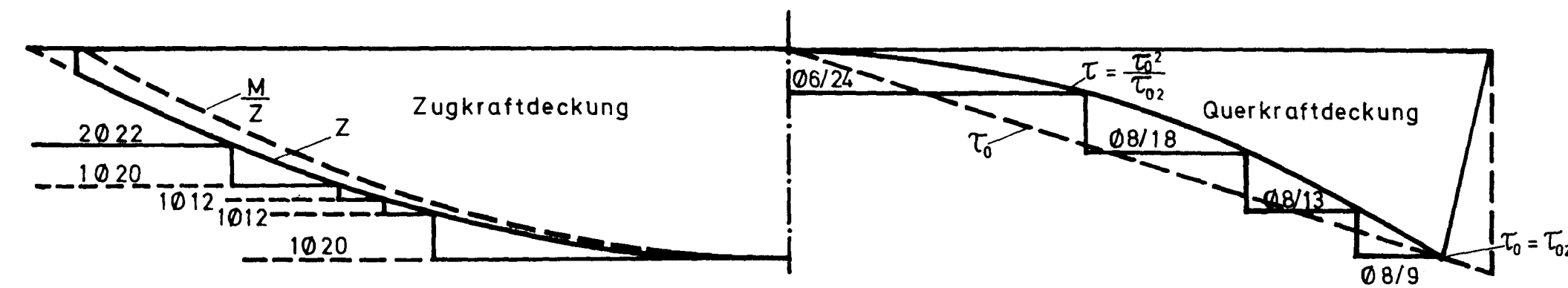
Bewehrungsplan

Anlage 1.13

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig



- ⑤ 28 Ø 8, L = 0,82 m
- ⑥ 8 Ø 6, L = 0,82 m
- ⑦ 72 Ø 8, L = 0,28 m



Querschnitt M 1:5

Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d

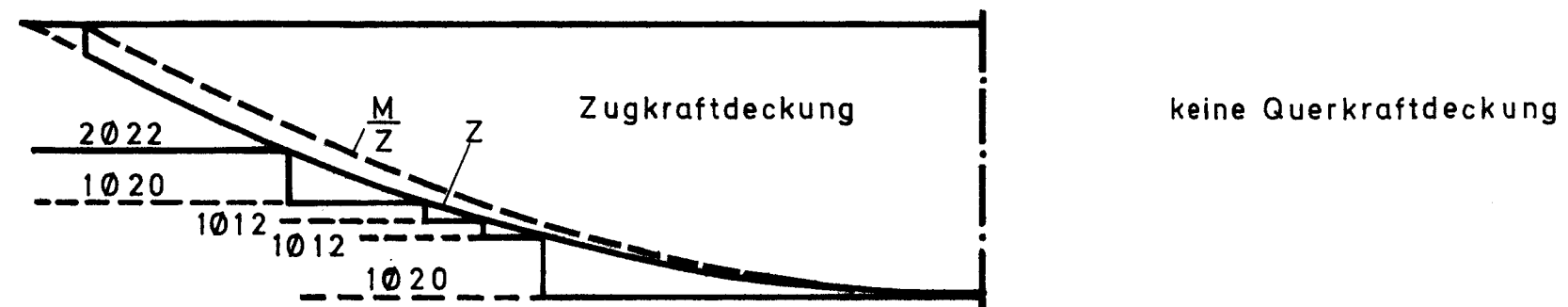
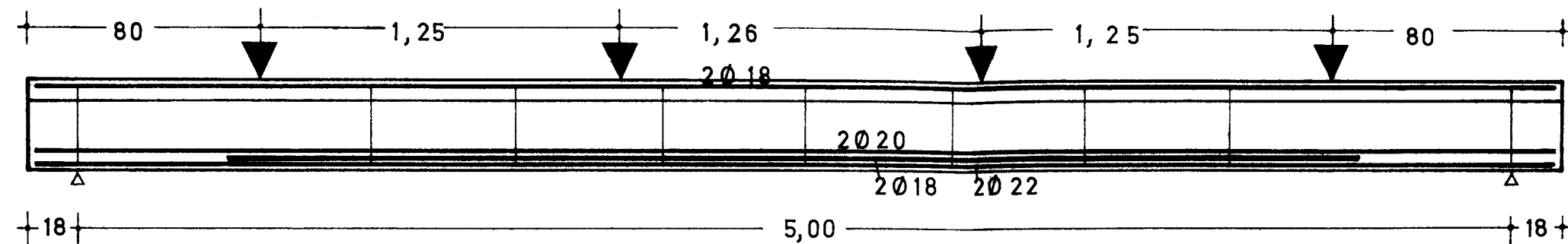
### Stahlliste

Nr.	Stck.	Ø	L	6	8	12	18	20	22
1	2	18	5,32				10,64		
2	2	20	4,57					9,14	
3	2	12	3,78			7,56			
4	2	22	5,32						10,64
5	28	8	0,82		22,96				
6	8	6	0,82	6,56					
7	72	8	0,28		20,16				
m				6,56	43,12	7,56	10,64	9,14	10,64
kg				2	17	7	22	23	32

103 kg St. 42/50 RK

Bn 250/St. 42/50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 14
Bewehrungsplan	Anlage 1.14
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig	



① 2 Ø 18 , L = 5,32 m

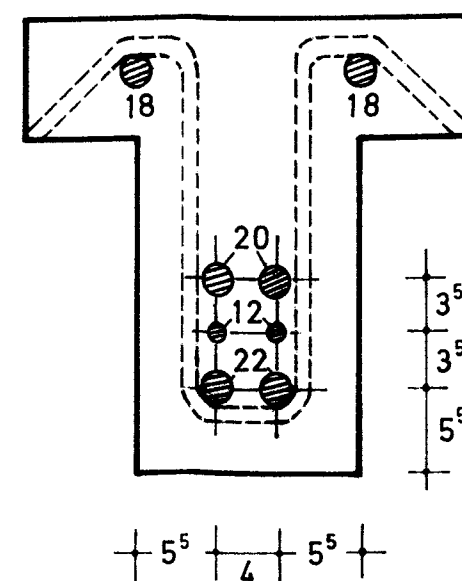
77 ———— | ② 1+1 = 2 Ø 20 , L = 4,57 m

71 ———— | ② 1 Ø 20

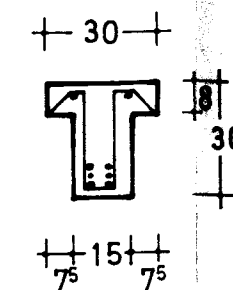
87 ———— | ③ 1+1 = 2 Ø 12 , L = 3,78 m

③ 1 Ø 12

④ 2 Ø 22 , L = 5,32 m



Querschnitt M 1:5



⑤ 9 Ø 8 , L = 0,80 m  
nach Muster biegen

### Stahlliste

Nr.	Stck.	Ø	L	8	12	18	20	22
1	2	18	5,32			10,64		
2	2	20	4,57				9,14	
3	2	12	3,78		7,56			
4	2	22	5,32					10,64
5	9	8	0,80	7,20				
m				7,20	7,56	10,64	9,14	10,64
kg				3	7	22	23	32

87 kg St. 42/ 50 RK

Bn 250/ St. 42/ 50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

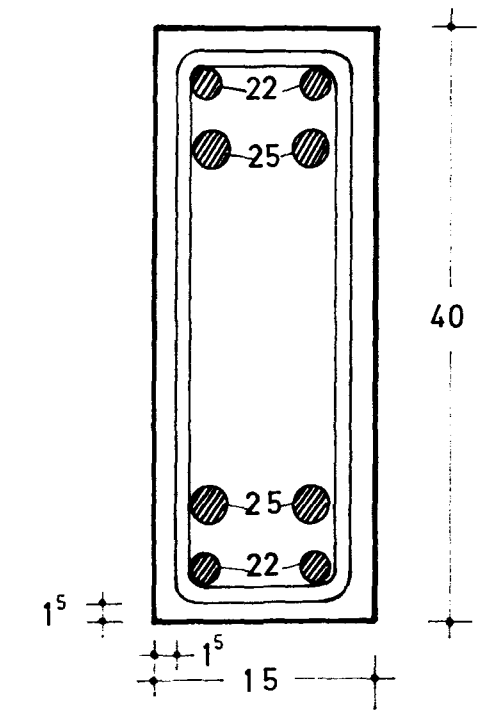
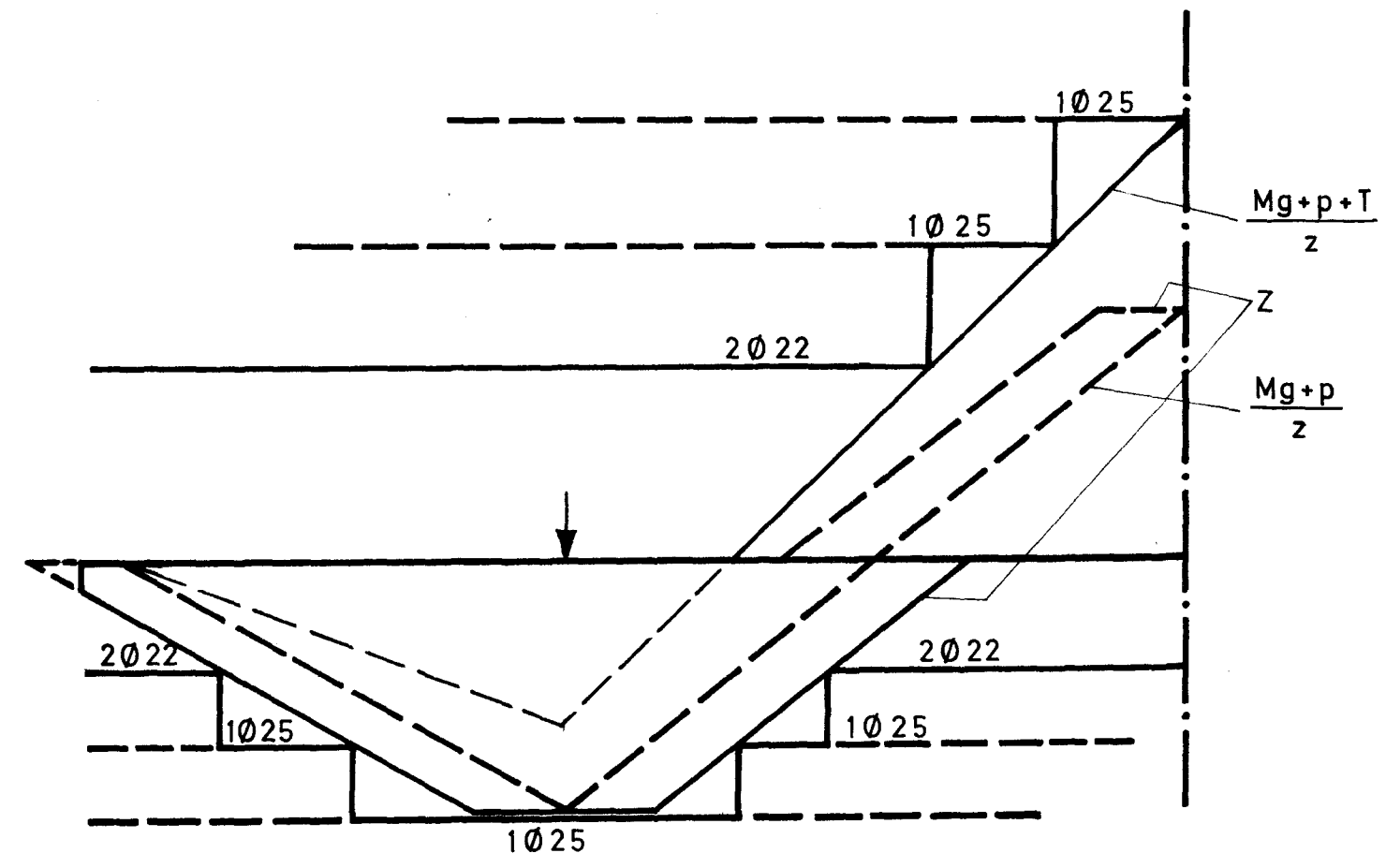
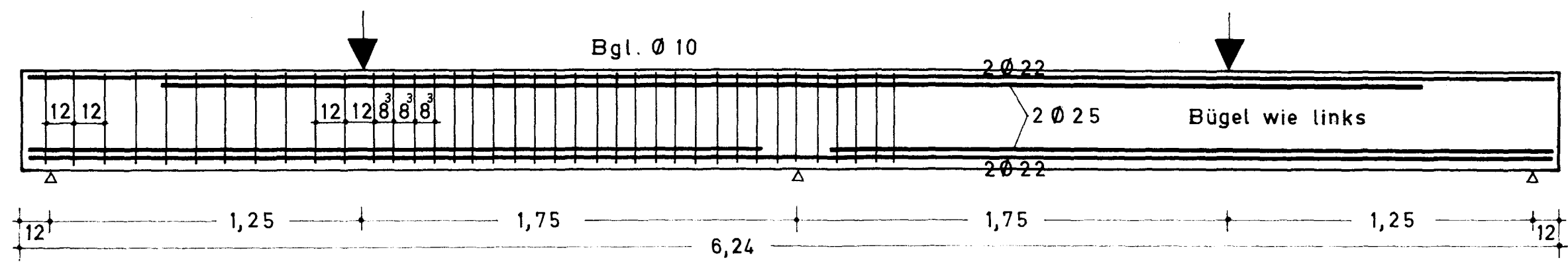
Balken 15

Bewehrungsplan

Anlage 1.15

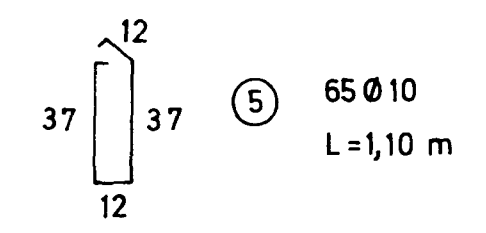
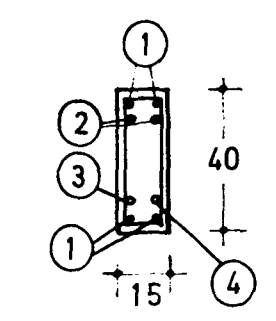
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig





Querschnitt M 1:5

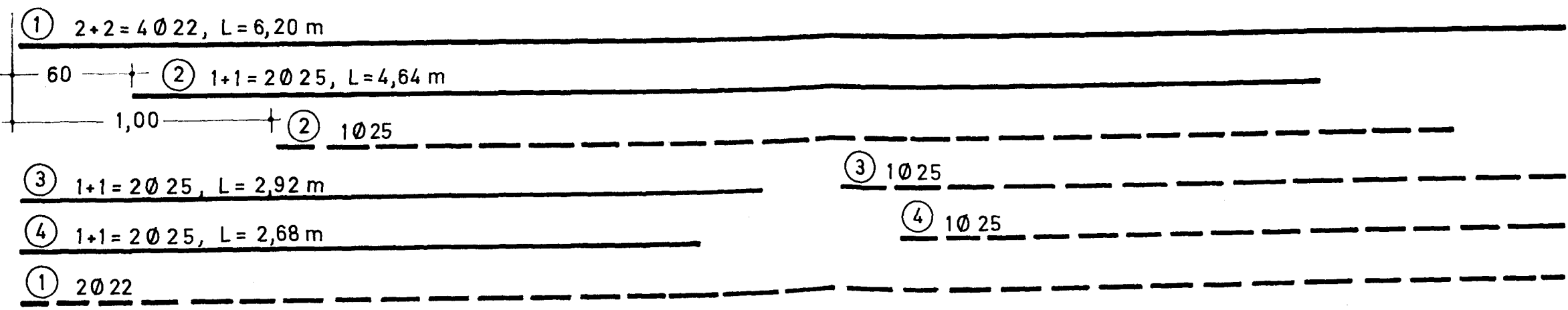
Biegerollendurchmesser der Bügel: 5d



### Stahlliste

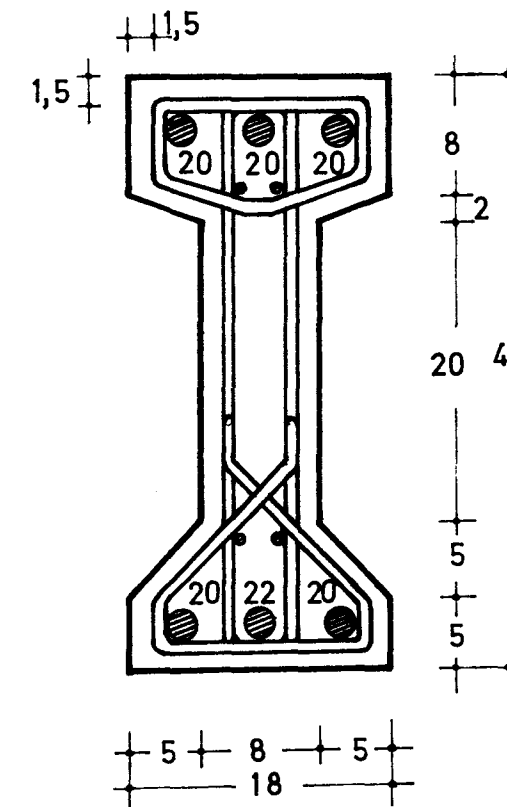
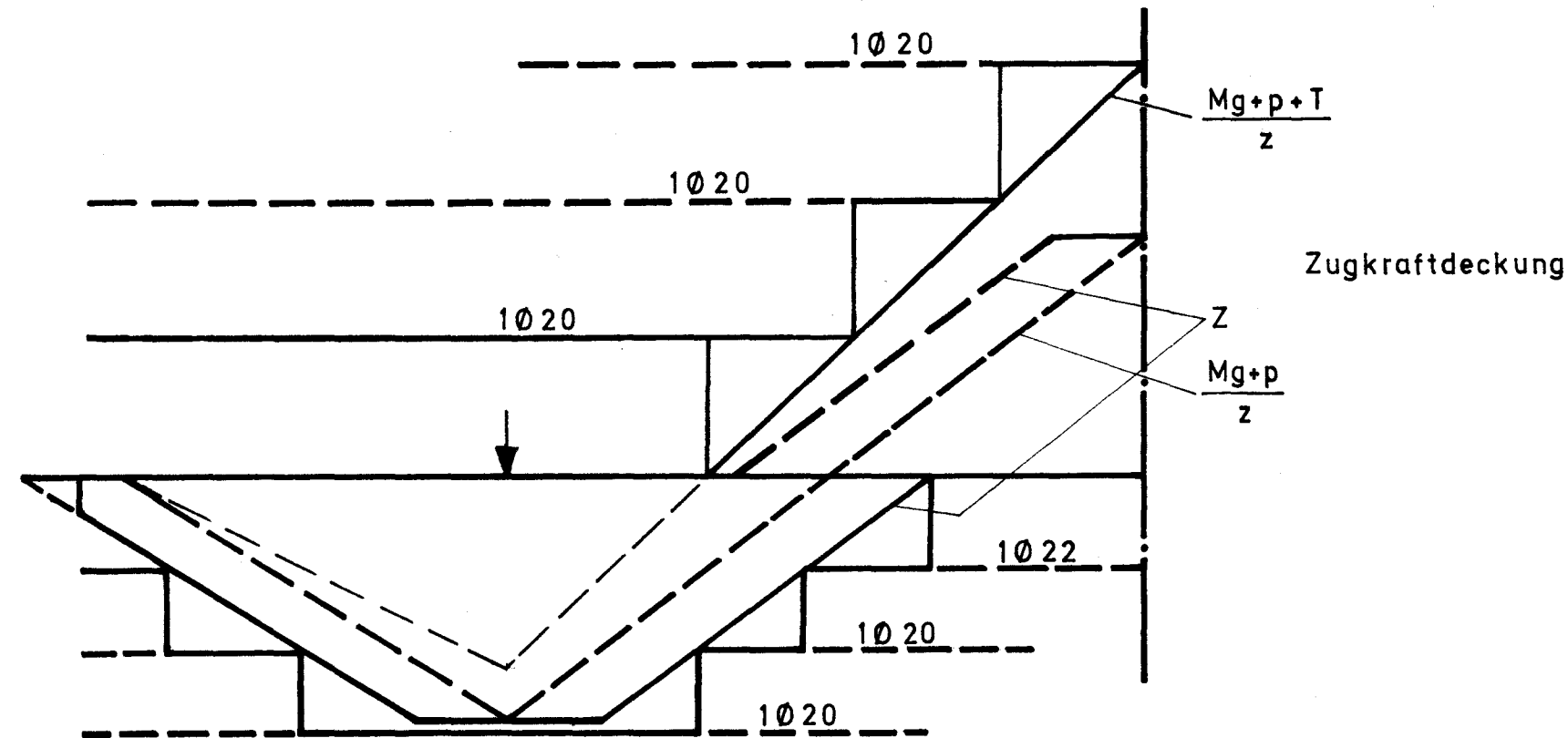
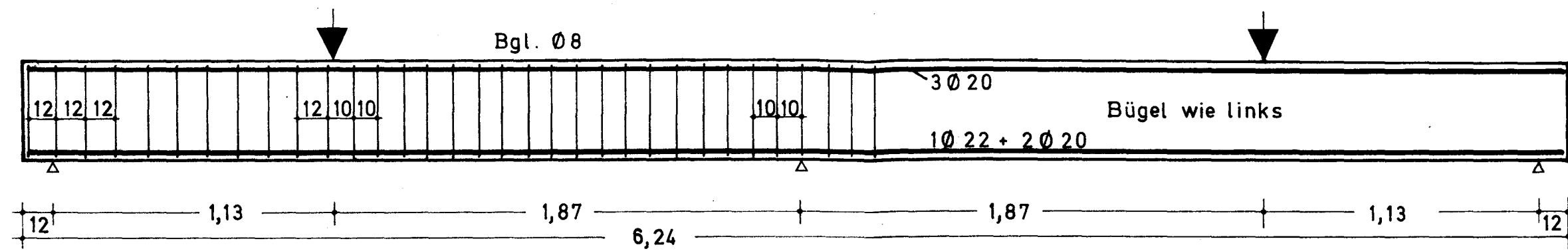
Nr.	Stck.	Ø	L	10	22	25
1	4	22	6,20		24,80	
2	2	25	4,64			9,28
3	2	25	2,92			5,84
4	2	25	2,68			
5	65	10	1,10	71,50		
m:				71,50	24,80	20,48
kg:				44	45	80

169 kg St. 42/50 RK



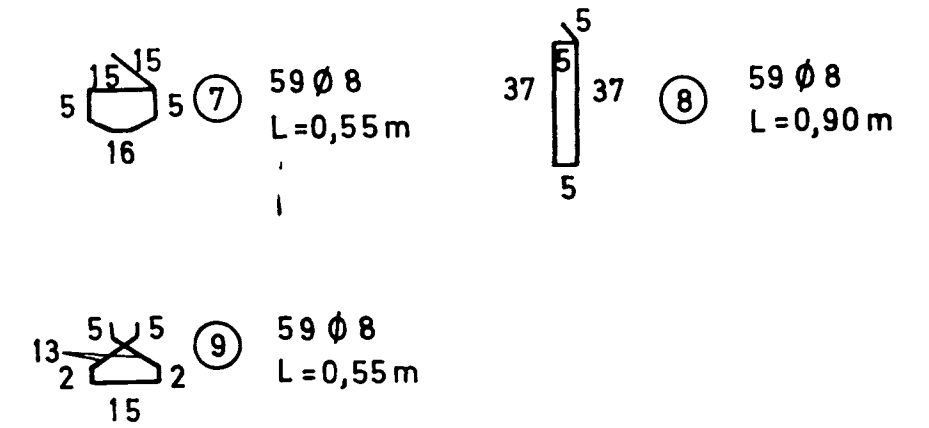
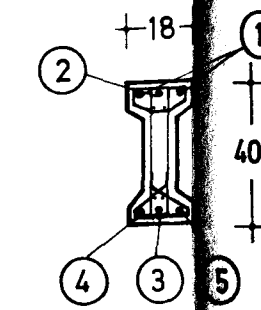
Bn 250/ St. 42/50 RK

Stabversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 16
Bewehrungsplan	Anlage 1.16



Querschnitt M 1:5

Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d

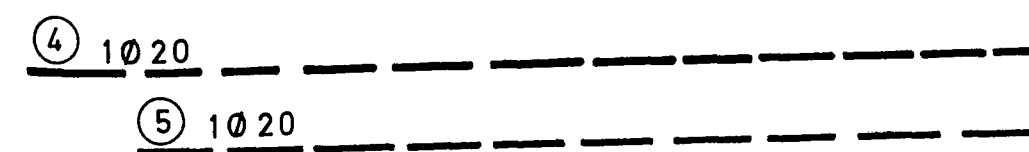
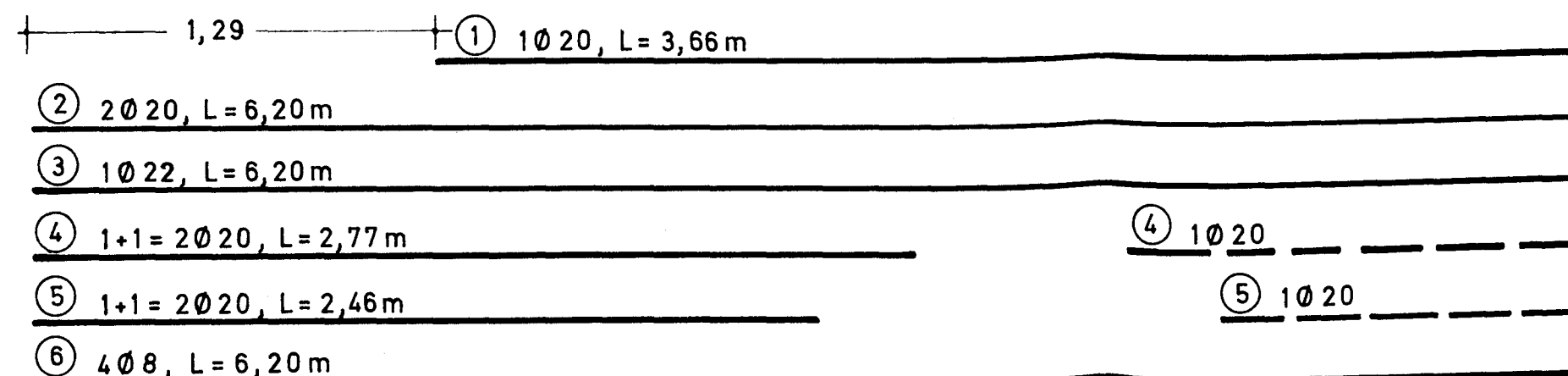


### Stahlliste

Nr.	Stck.	Ø	L	8	20	22
1	1	20	3,66		3,66	
2	2	20	6,20		12,40	
3	1	22	6,20			6,20
4	2	20	2,77		5,54	
5	2	20	2,46		4,92	
6	4	8	6,20	24,80		
7	59	8	0,55	32,45		
8	59	8	0,90	53,10		
9	59	8	0,55	32,45		
m:				142,80	26,52	6,20
kg:				57	66	19

142 kg St. 42/ 50 RK

Bn 250/ St. 42/50 RK

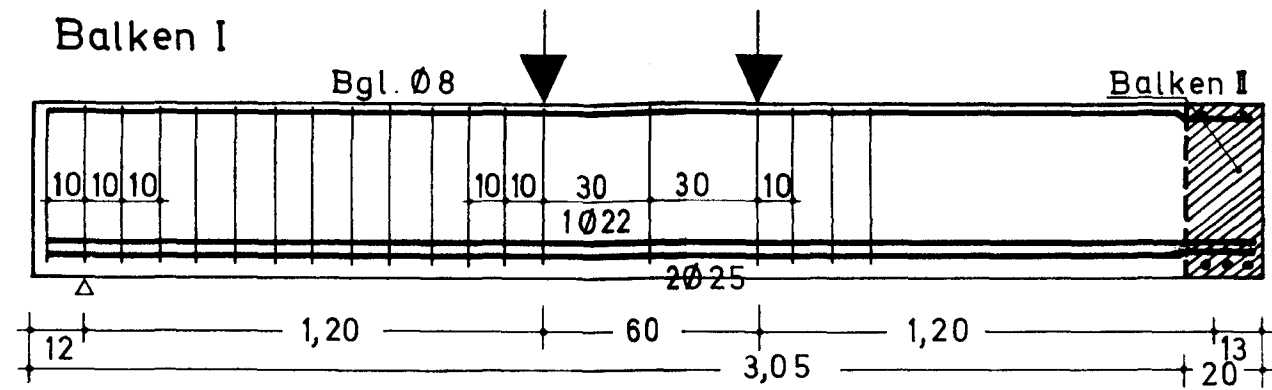


Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

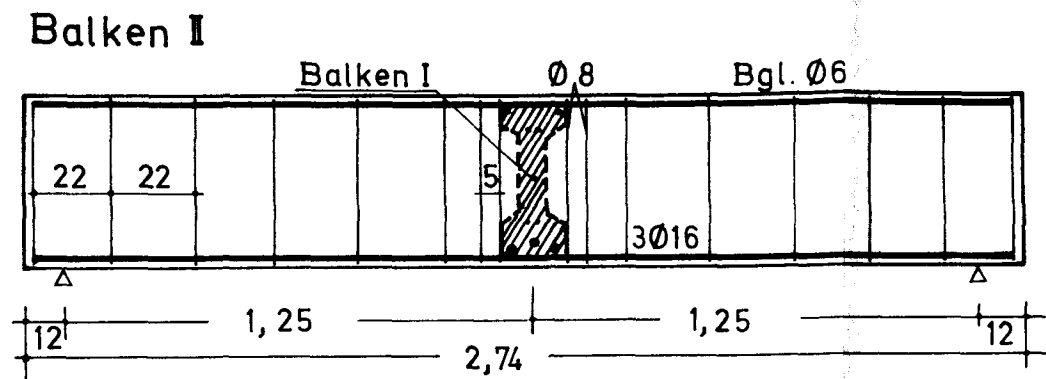
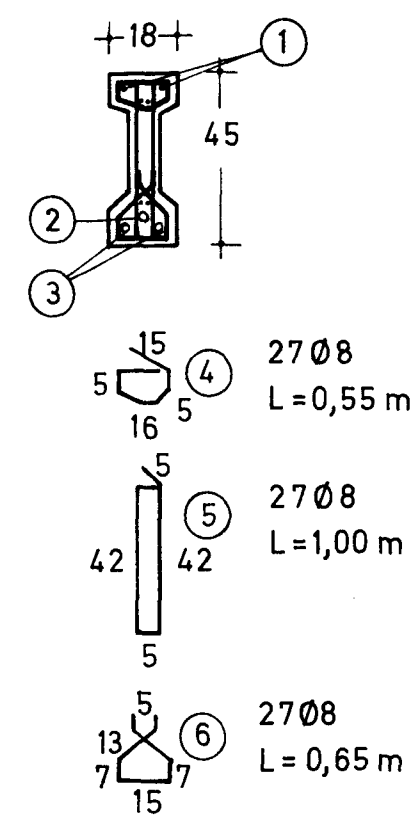
Balken 17

Bewehrungsplan

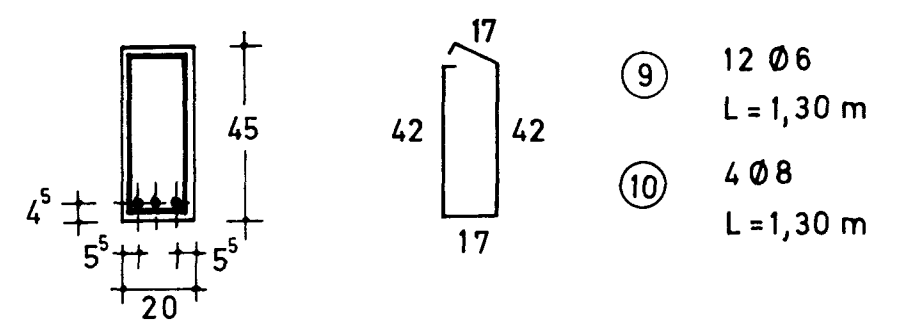
Anlage 1.17



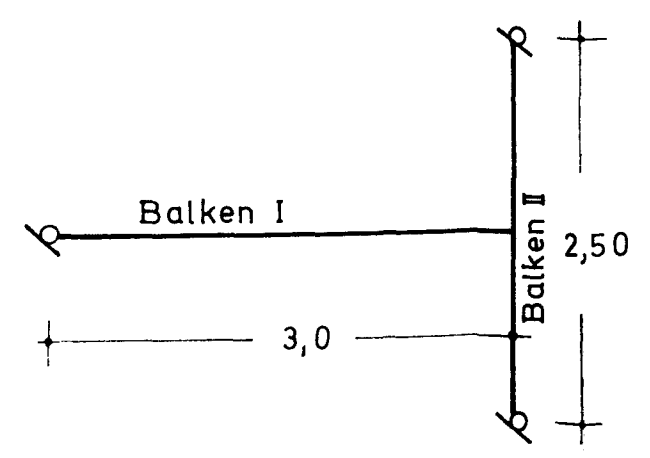
- ① 6 Ø 8, L = 3,21 m
- ② 1 Ø 22, L = 3,21 m
- ③ 2 Ø 25, L = 3,21 m



- ⑦ 2 Ø 8, L = 2,70 m
- ⑧ 3 Ø 16, L = 2,70 m

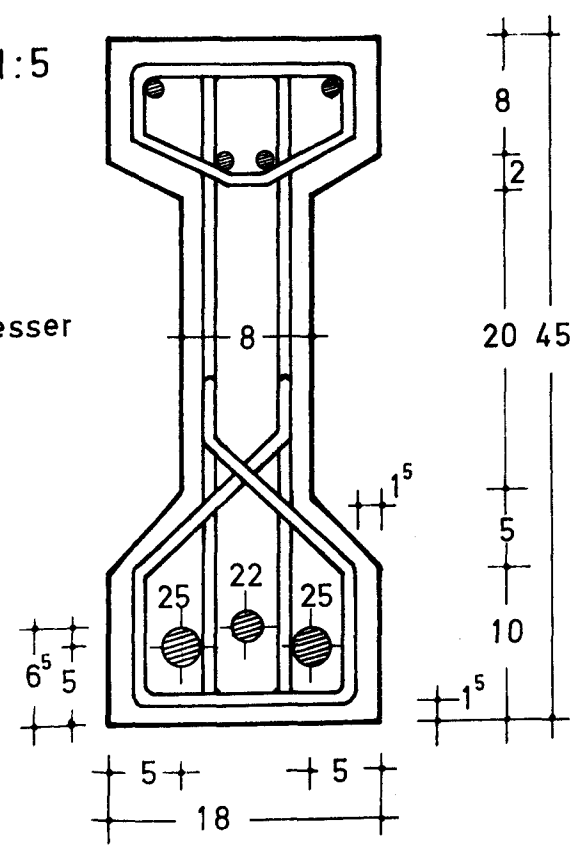


Grundriß



Querschnitt M 1:5  
Balken I

Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d



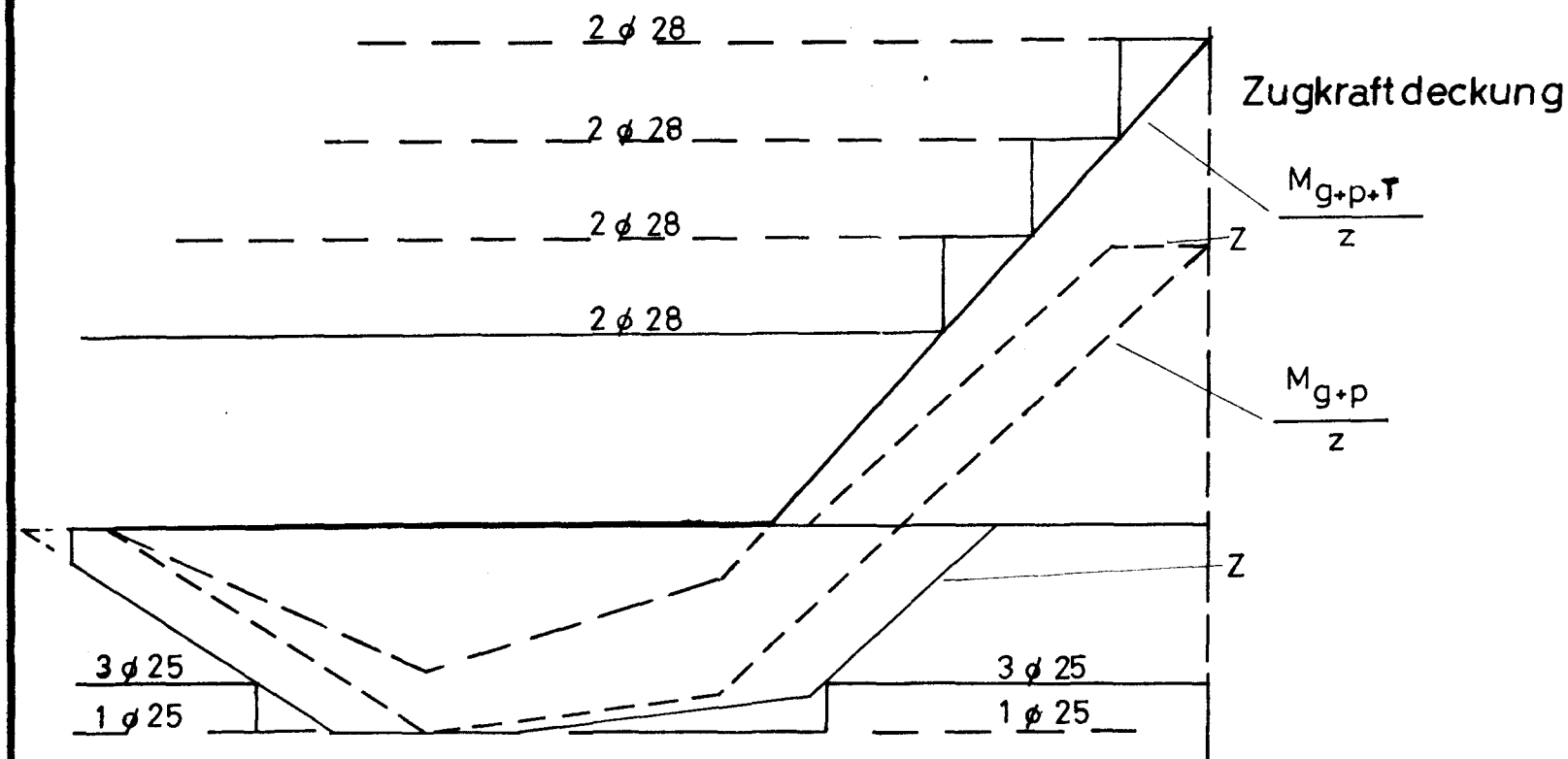
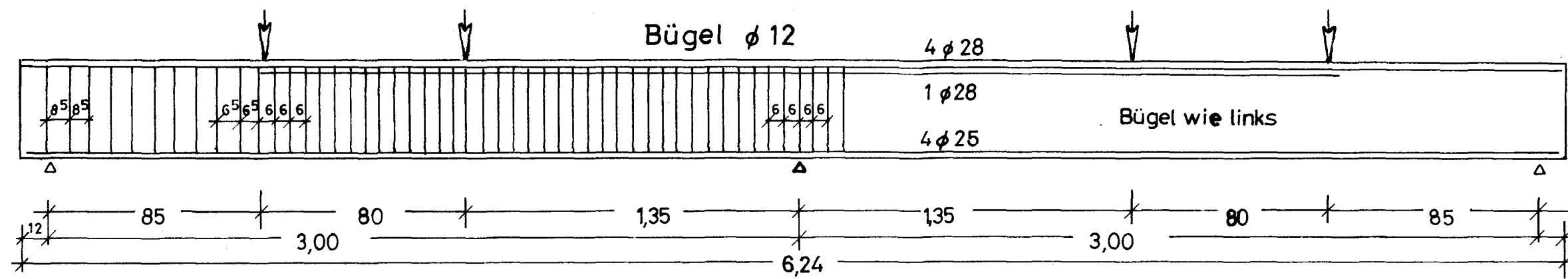
Stahlliste

Nr.	Stck.	Ø	L	6	8	16	22	25
1	6	8	3,21		19,26			
2	1	22	3,21				3,21	
3	2	25	3,21					6,42
4	27	8	0,55		14,85			
5	27	8	1,00		27,00			
6	27	8	0,65		17,55			
7	2	8	2,70		5,40			
8	3	16	2,70			8,10		
9	12	6	1,30	15,60				
10	4	8	1,30					
m :				15,60	89,26	8,10	3,21	6,42
kg :				4	36	13	10	25

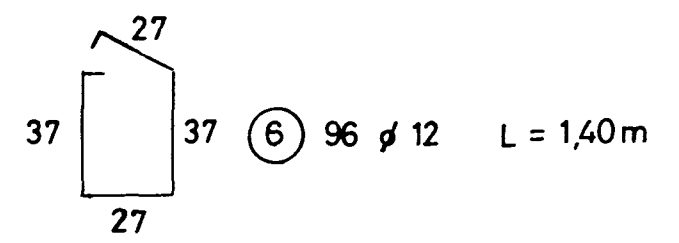
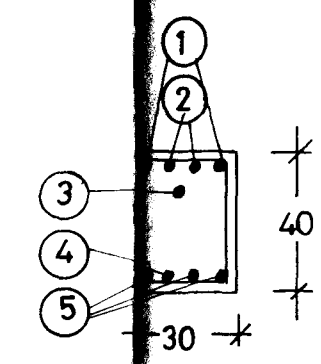
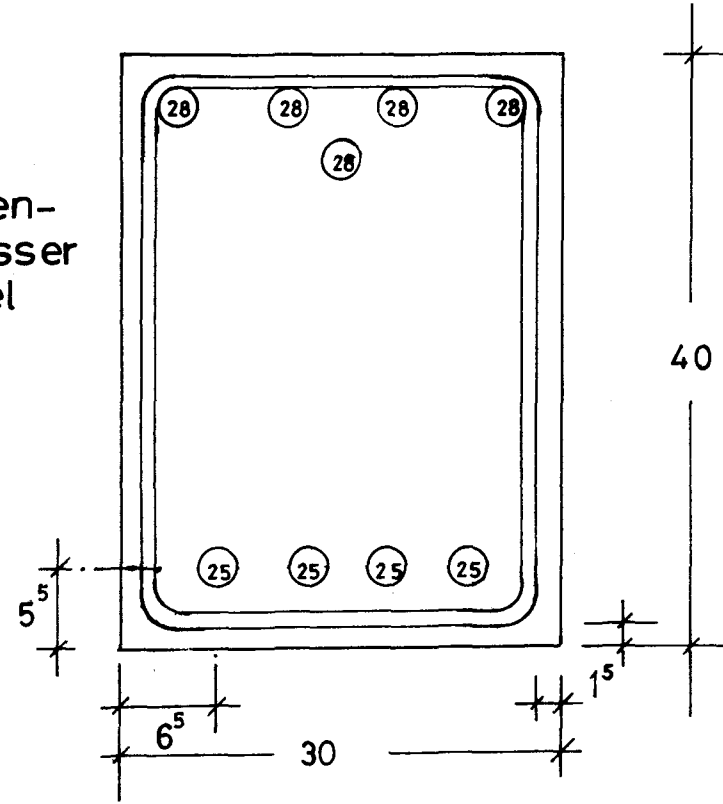
88 kg St. 42/50 RK

Bn 250/42/50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 18
Bewehrungsplan	Anlage 1.18



Biegerollen-  
durchmesser  
der Bügel  
5 d



Stahlliste

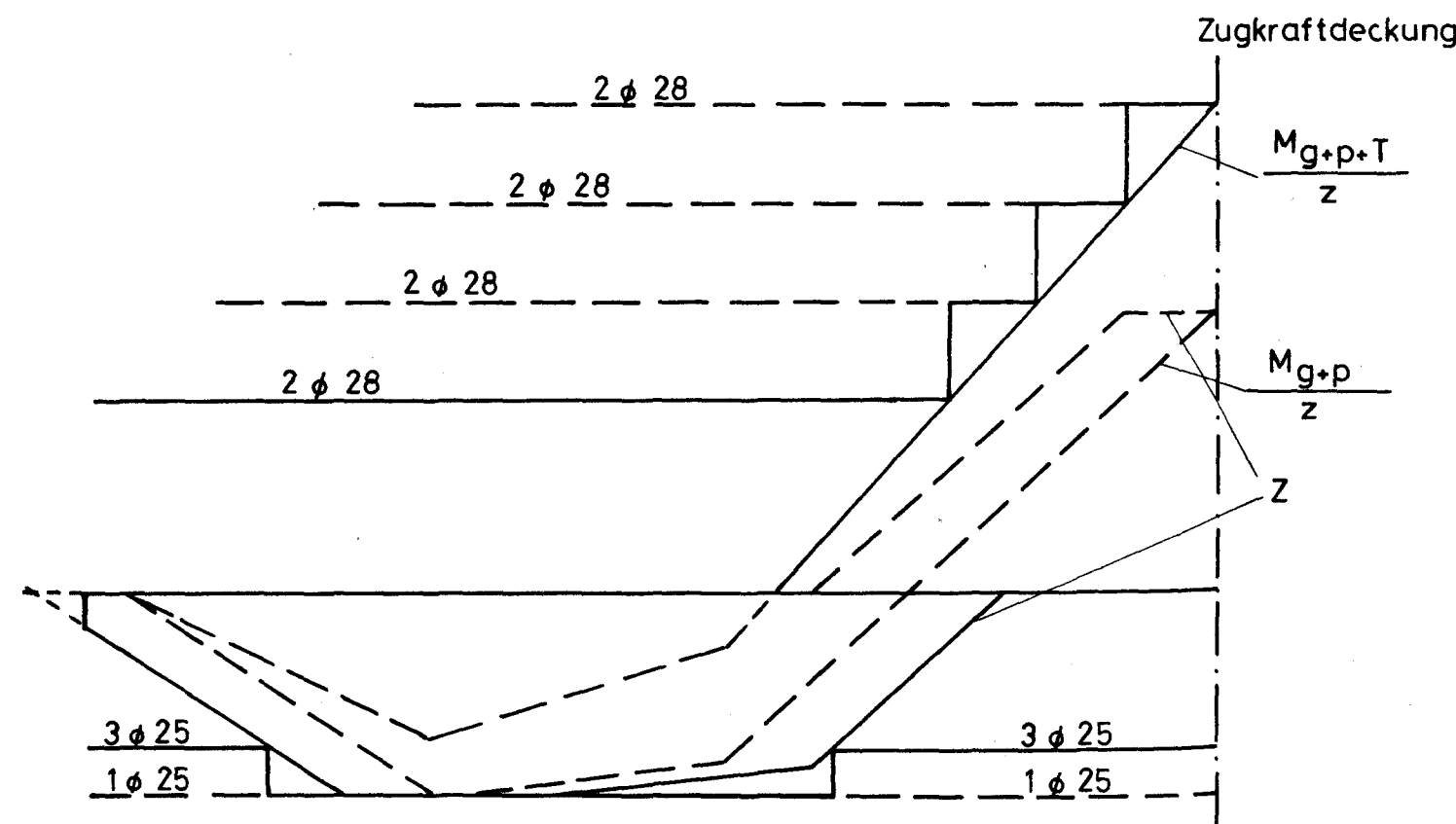
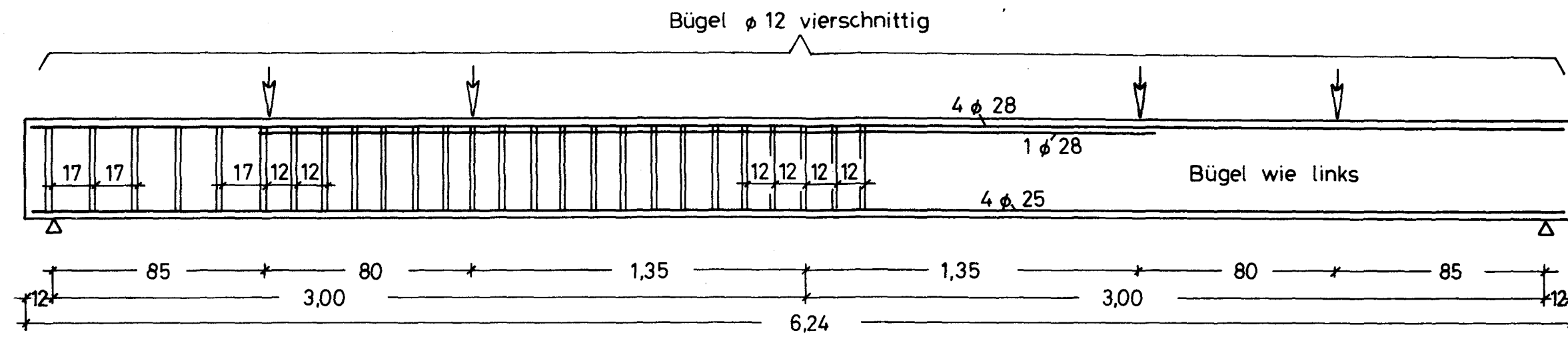
Nr	Stck	φ	L	12	25	28
1	2	28	6,20			12,4
2	2	28	5,27			10,5
3	1	28	4,44			4,4
4	2	25	2,90		5,8	
5	3	25	6,20		18,6	
6	96	12	1,40	134,4		
m				134,4	24,4	27,3
Kg				120	94	133

347 Kg St 42/50

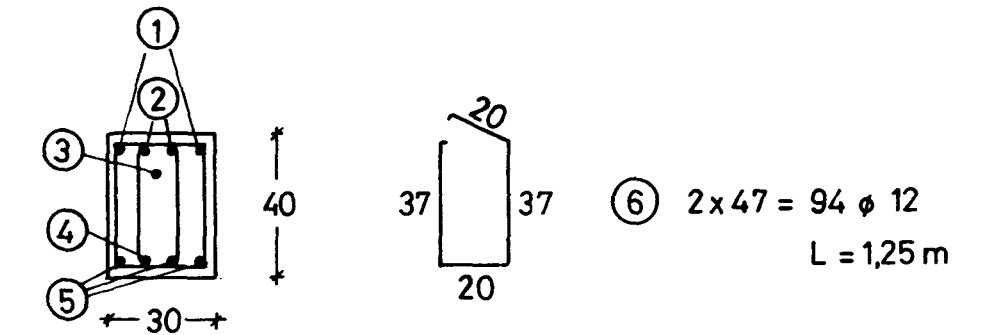
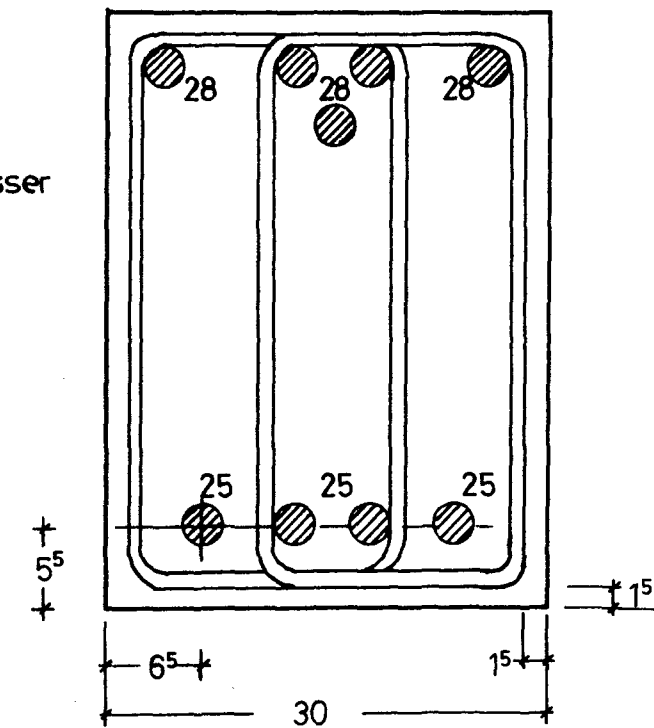
Bn 250/St42/50RK

- ① 2 φ 28, L = 6,20 m
- ② 1+1 = 2 φ 28, L = 5,27 m
- ③ 1 φ 28, L = 4,44 m
- ④ 1+1 = 2 φ 25, L = 2,90 m
- ⑤ 3 φ 25, L = 6,20 m
- ④ 1 φ 25

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 19
Bewehrungsplan	Anlage 1.19



Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d

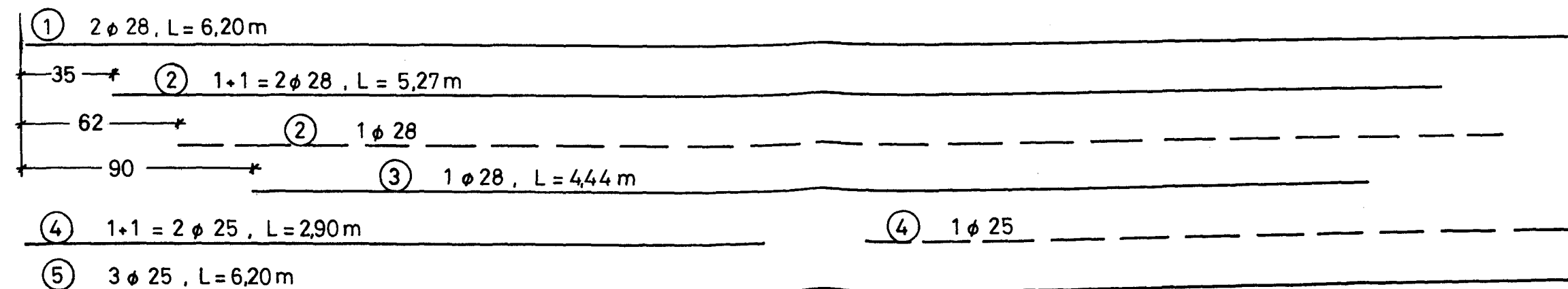


Stahlliste

Nr.	Stck.	$\phi$	L	12	25	28
1	2	28	6,20			12,4
2	2	28	5,27			10,5
3	1	28	4,44			4,4
4	2	25	2,90		5,8	
5	3	25	6,20		18,6	
6	94	12	1,25	117,5		
m				117,5	24,4	27,3
kg				105	95	132

332 kg St. 42/50 RK

Bn 250/St 42/50 RK



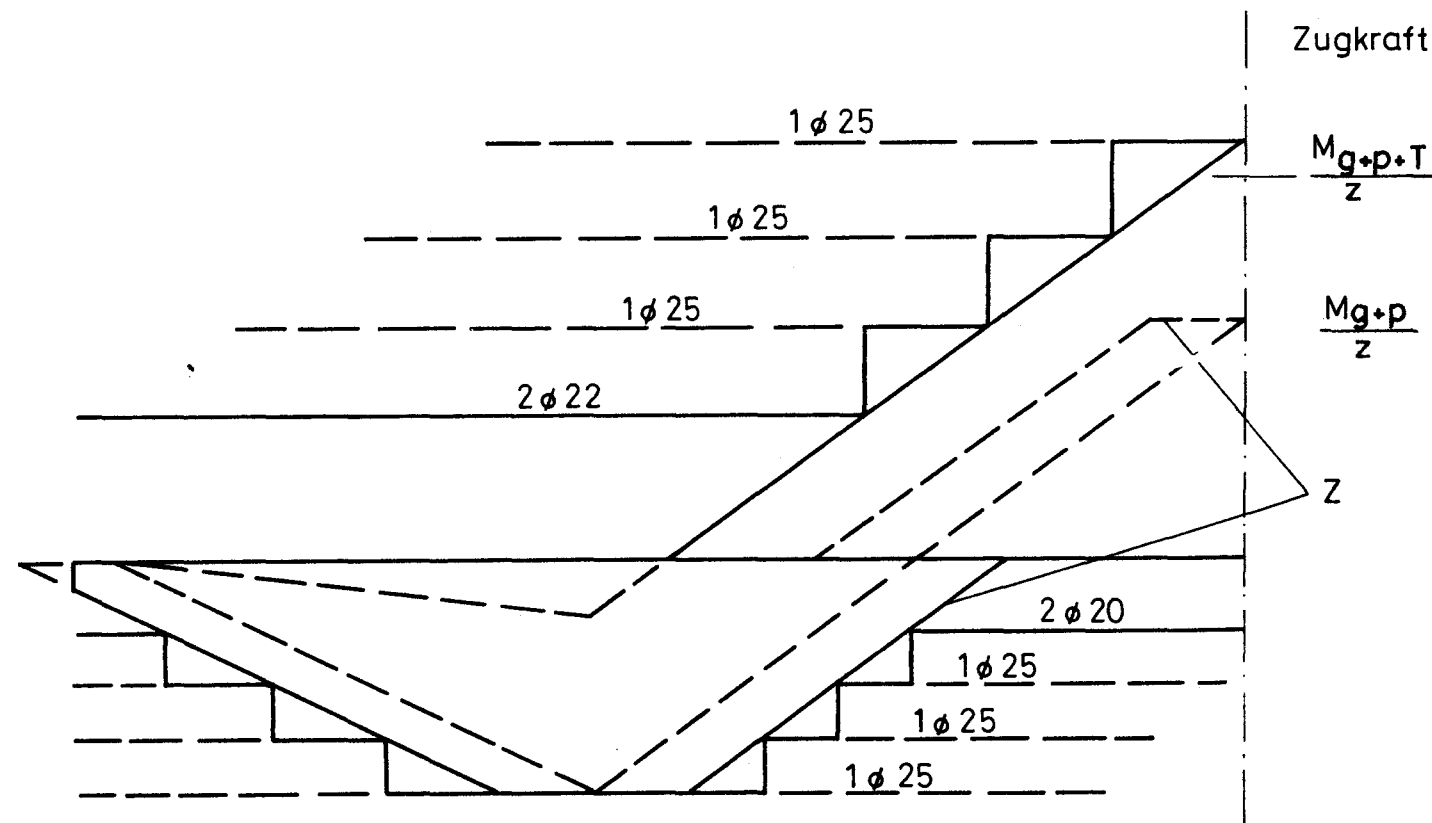
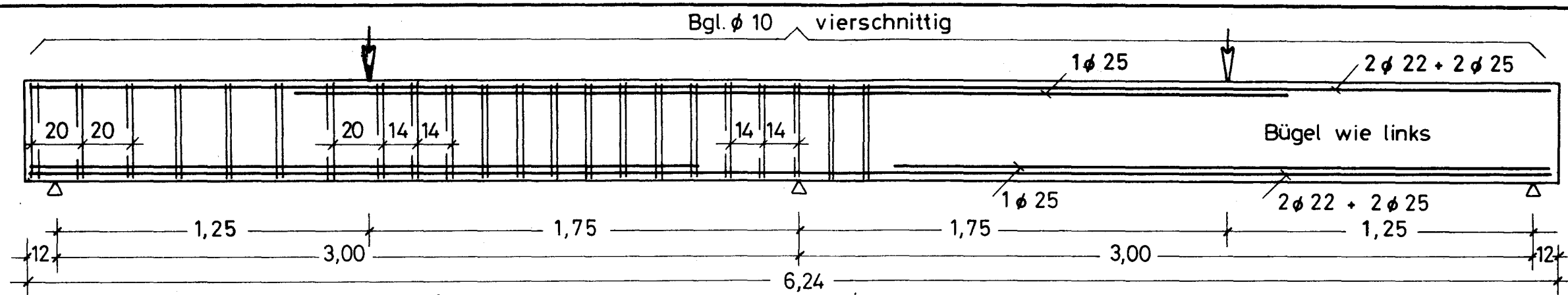
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 20

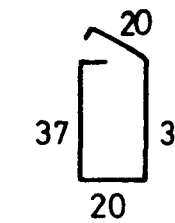
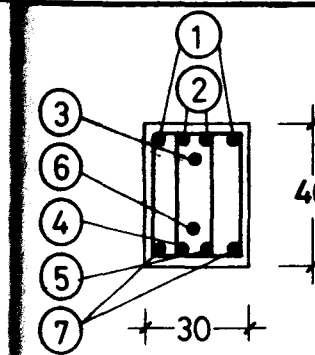
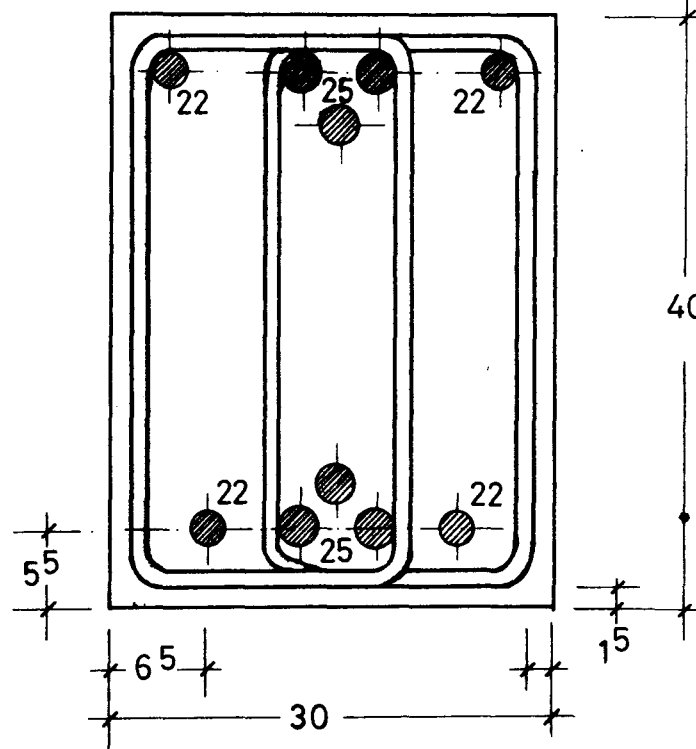
Bewehrungsplan

Anlage 1.20

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Eichstelle für das Baugesam



Biegerollendurchmesser  
der Bügel 5d



⑧  $2 \times 39 = 78 \phi 10$   
 $L = 1,25 \text{ m}$

# Stahlliste

Nr.	Stck.	φ	L	10	20	22	25
1	2	22	6,20			12,40	
2	2	25	4,98				10,00
3	1	25	4,08				4,10
4	2	25	3,05				6,10
5	2	25	2,85				5,70
6	2	25	2,65				5,30
7	2	20	6,20		12,40		
8	78	10	1,25	97,50			
m:				97,50	12,40	12,40	31,20
kg:				61,00	31,00	37,00	121,00

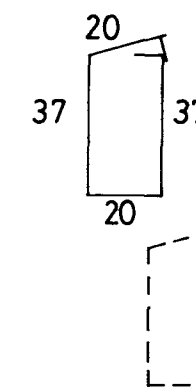
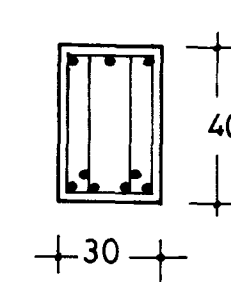
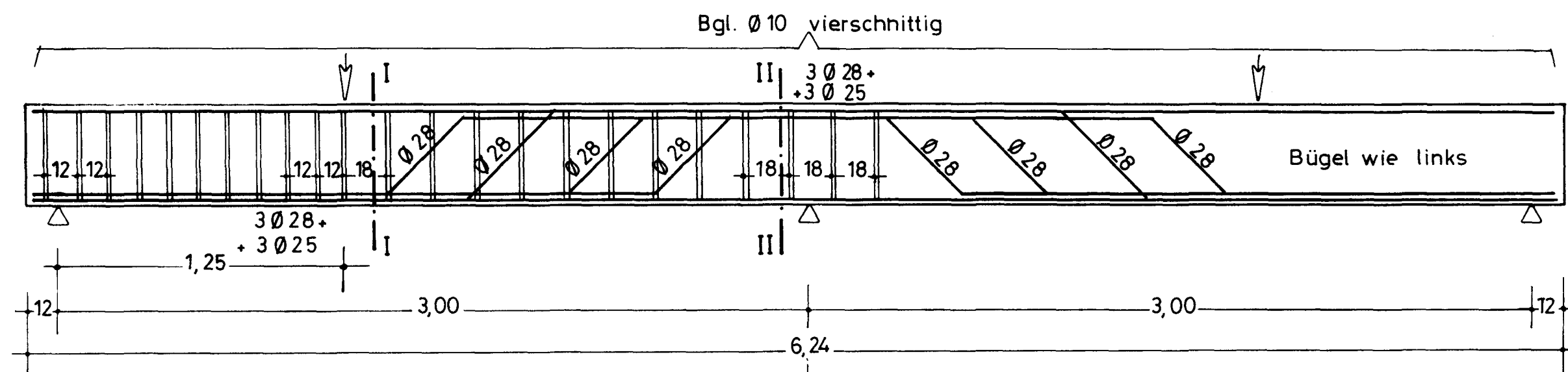
250 kg St 42 / 50

Bn 250 / St 42 / 50 RK

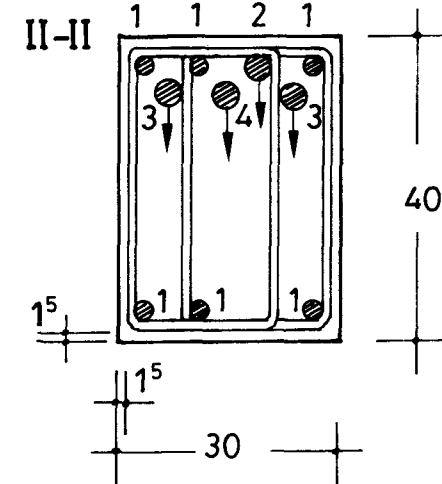
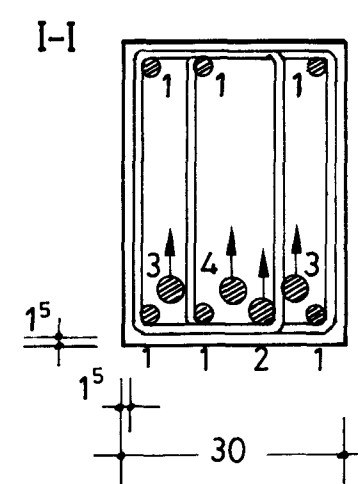
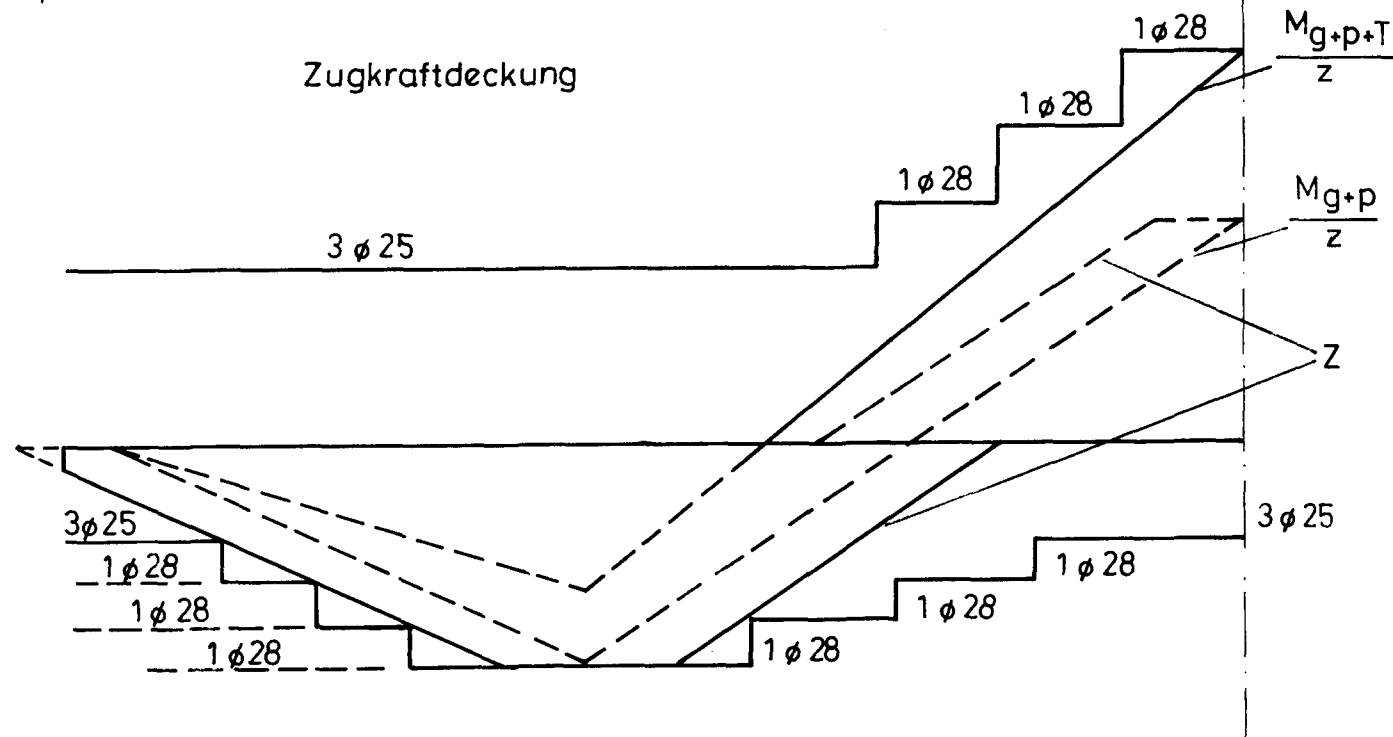
- ①  $2 \phi 22, L = 6,20$
- ②  $1+1=2 \phi 25, L = 4,98 \text{ m}$
- ③  $1 \phi 25, L = 4,08 \text{ m}$
- ④  $1+1=2 \phi 25, L = 3,05 \text{ m}$
- ⑤  $1+1=2 \phi 25, L = 2,85 \text{ m}$
- ⑥  $1+1=2 \phi 25, L = 2,65 \text{ m}$
- ⑦  $2 \phi 20, L = 6,20 \text{ m}$
- ④  $1 \phi 25$
- ⑤  $1 \phi 25$
- ⑥  $1 \phi 25$

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 21
Bewehrungsplan	Anlage 1.21





5 84 Ø 10 L = 1,25

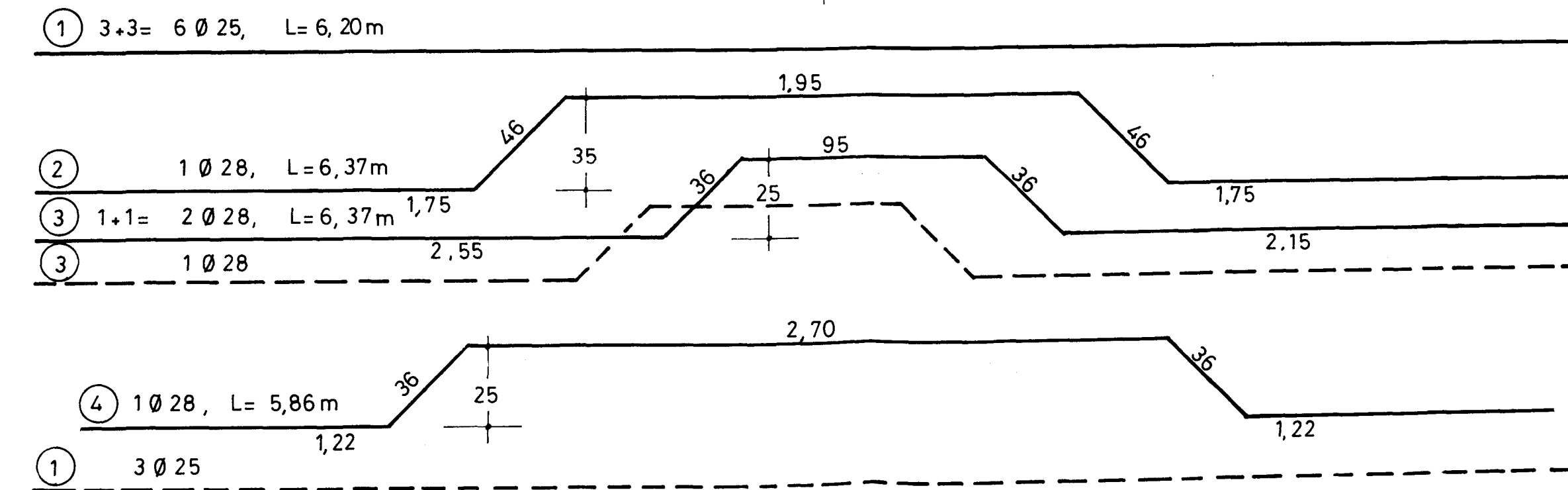


### Stahlliste

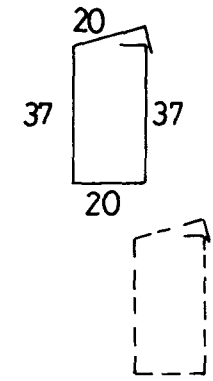
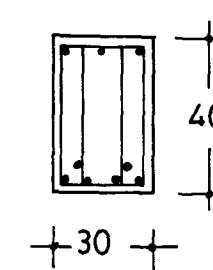
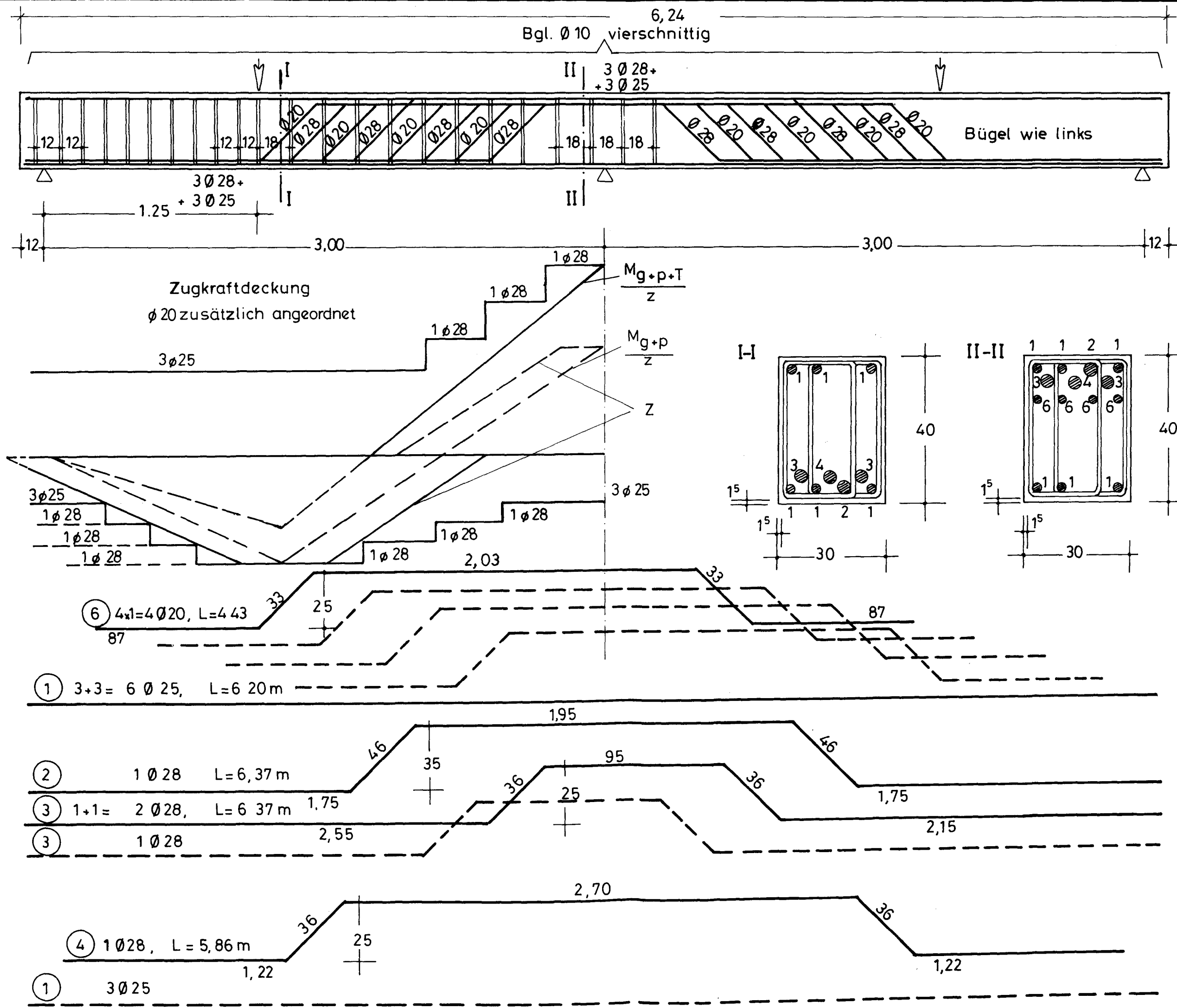
Nr.	Stck.	Ø	L	10	25	28
1	6	25	6,20	37,20		
2	1	28	6,37			6,37
3	2	28	6,37			12,74
4	1	28	5,86			5,86
5	84	10	1,25	105,00		
m:				105,00	37,20	24,97
kg				65	144	121

330 kg St 42 / 50 RK

Bn 250 / St 42 / 50 RK



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 22
Bewehrungsplan	Anlage 1.22



5 84 Ø 10 L = 1,25

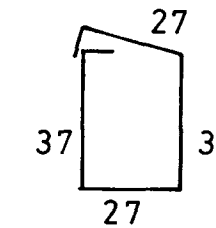
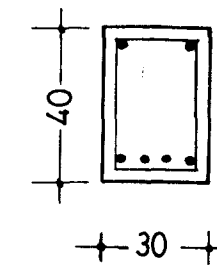
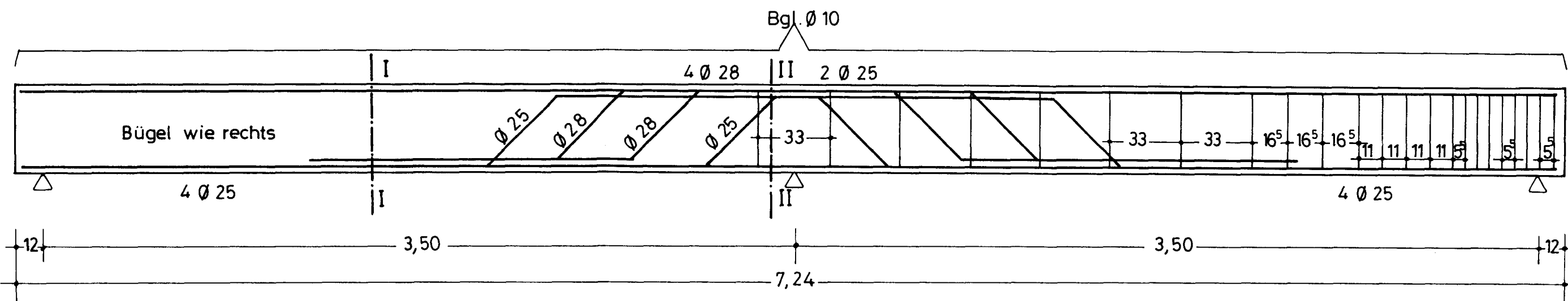
### Stahlliste

Nr.	Stück.	Ø	L	10	20	25	28
1	6	25	6,20			37,20	
2	1	28	6,37				6,37
3	2	28	6,37				12,74
4	1	28	5,86				5,86
5	84	10	1,20	105,00			
6	4	20	4,43		17,72		
m:				105,00	17,72	37,20	24,97
kg:				65	44	144	121

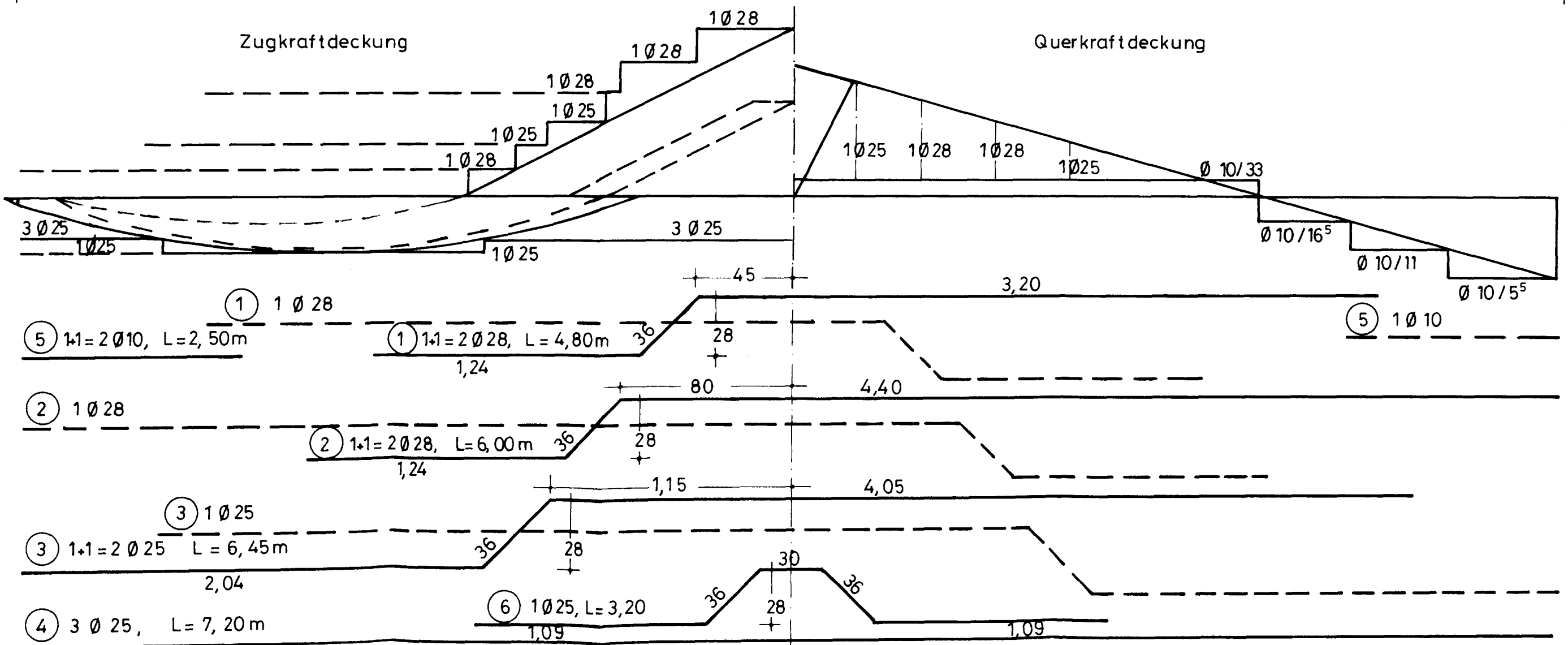
374 kg St 42 / 50 RK

Bn 250 / St 42 / 50 RK

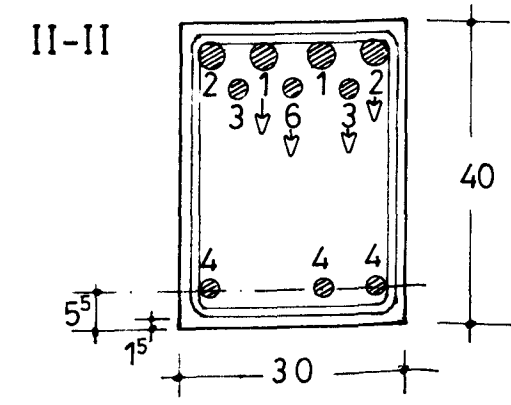
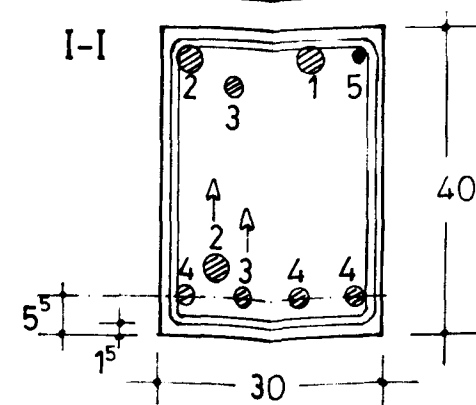
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 23
Bewehrungsplan	Anlage 1.23



⑦ 44 Ø 10 L = 1,40m



Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d



Querschnitt M 1:10

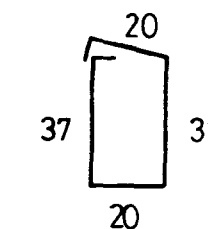
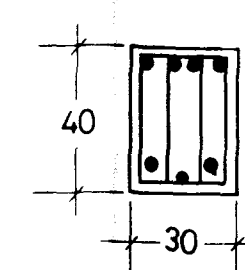
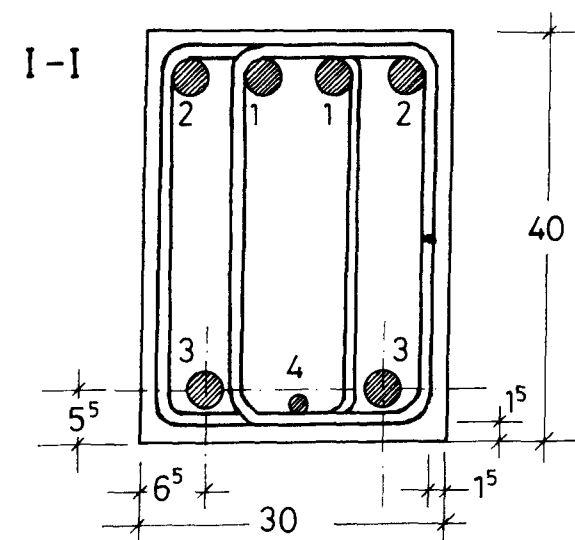
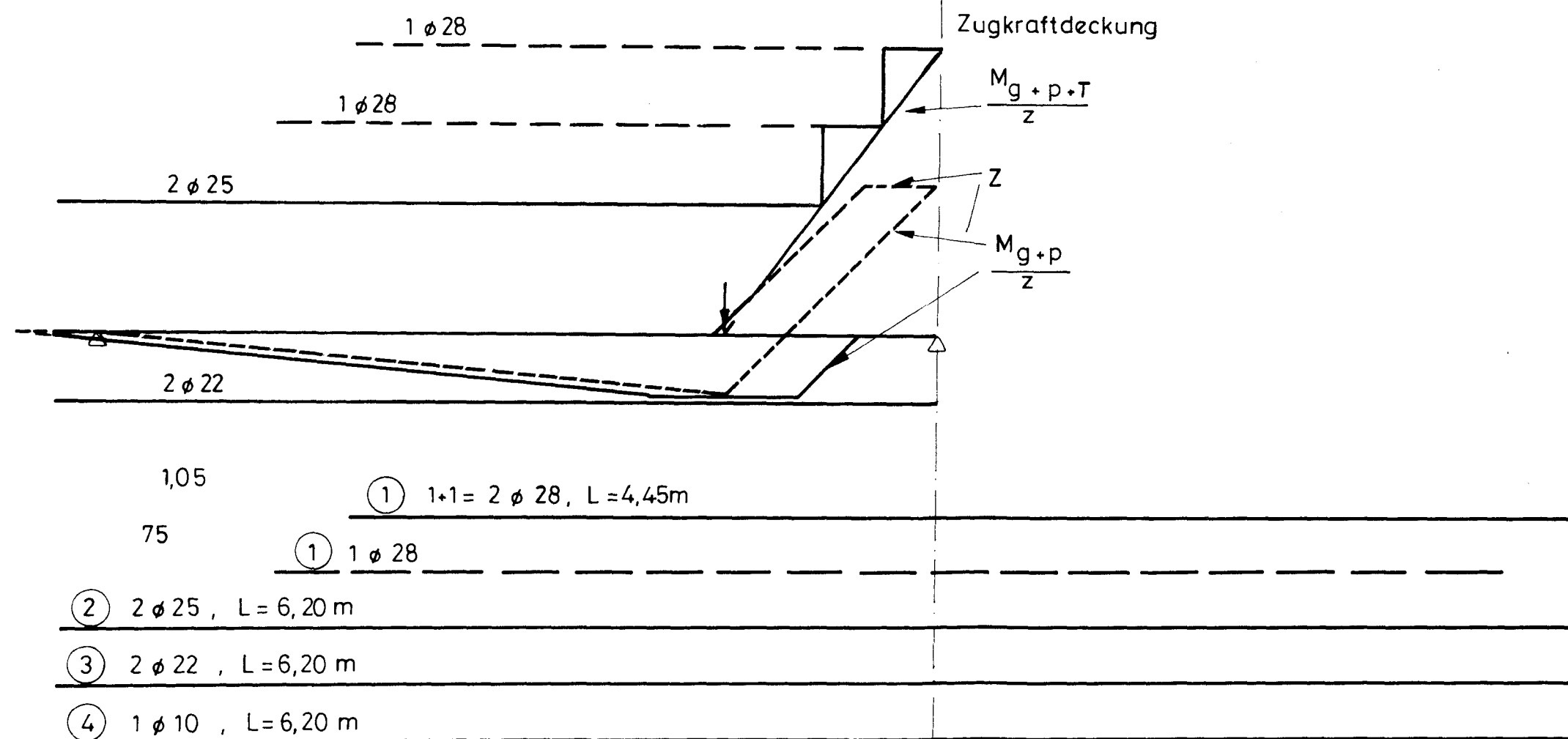
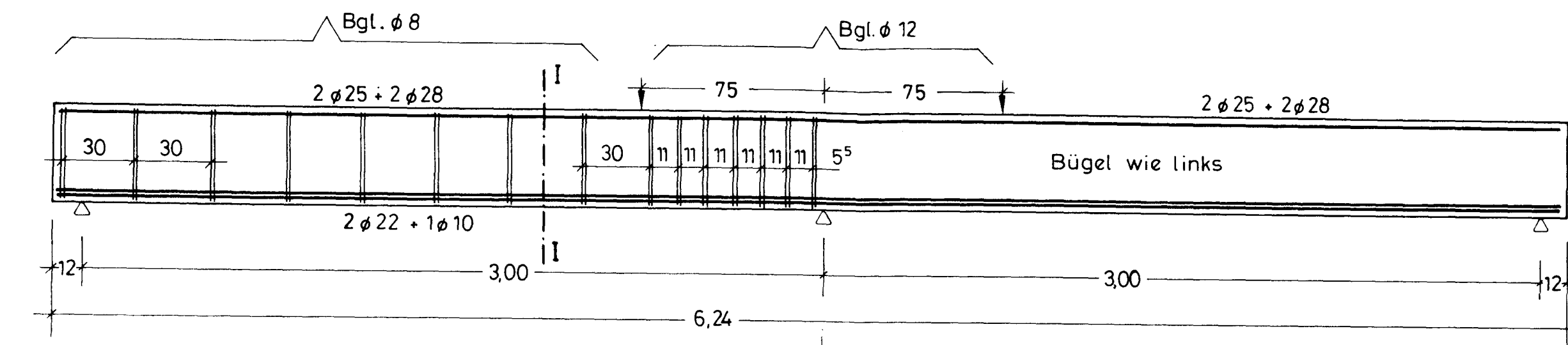
### Stahlliste

Nr.	Stck.	Ø	L	10	25	28
1	2	28	4,80			9,60
2	2	28	6,00			12,00
3	2	25	6,45		12,90	
4	3	25	7,20		21,60	
5	2	10	2,50	5,00		
6	1	25	3,20		3,20	
7	44	10	1,40	61,60		
m:				66,60	37,70	21,60
kg				42	146	104

292 kg St. 42 / 50 RK

Bn 250 / St 42/50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 24
Bewehrungsplan	Anlage 1.24



- ⑤ 28  $\phi 12$ , L = 1,25 m e = 11 cm  
⑥ 32  $\phi 8$ , L = 1,25 m e = 30 cm

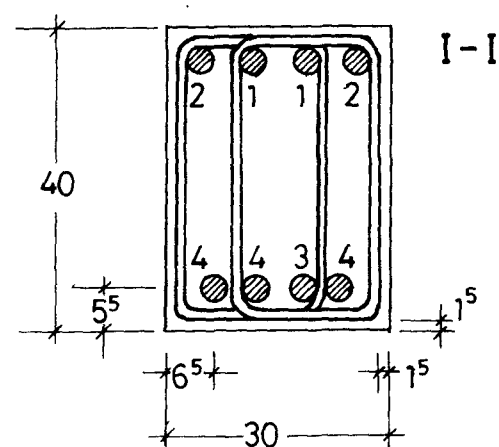
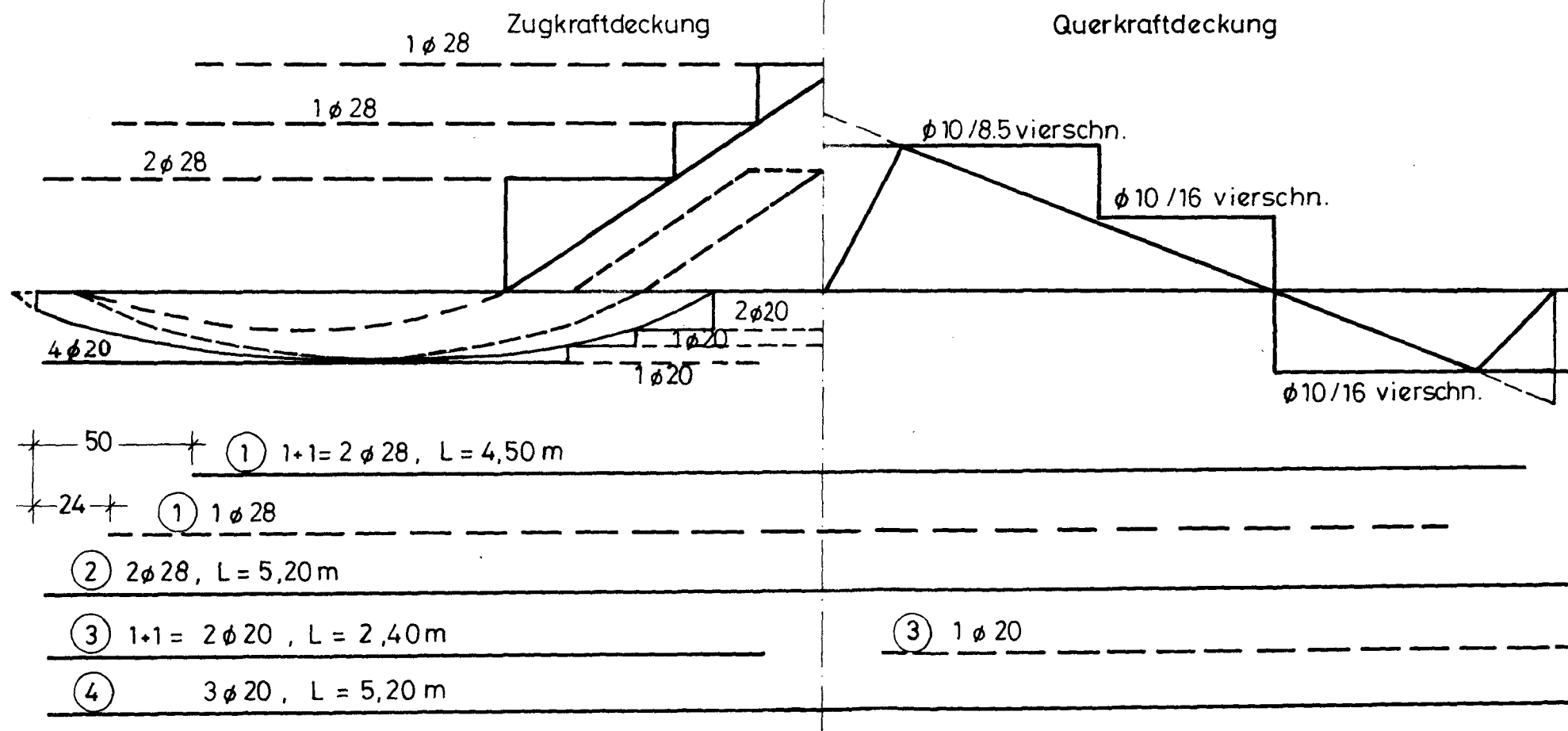
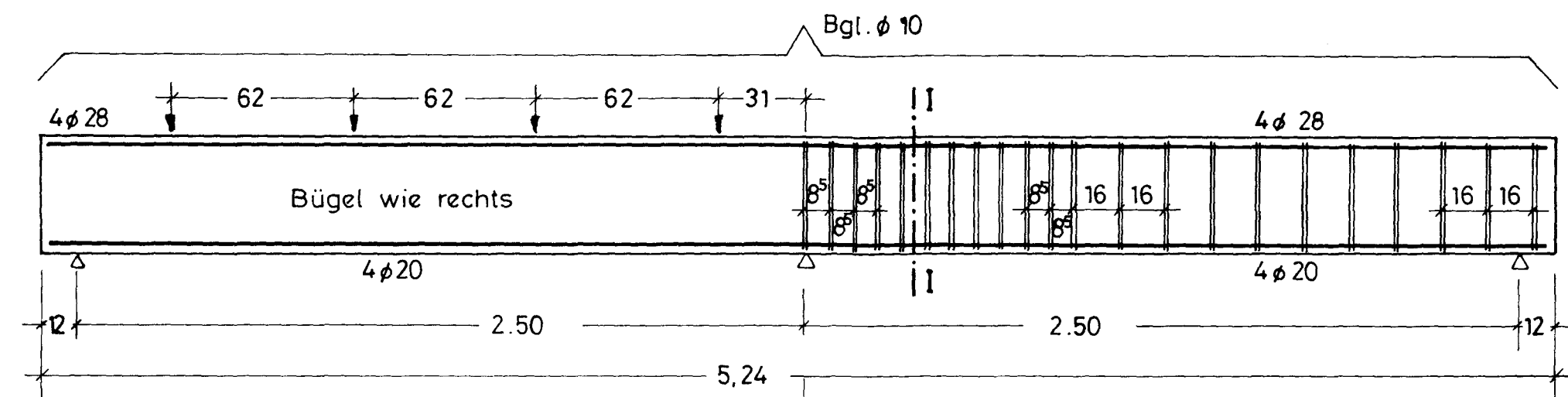
#### Stahlliste

Nr.	Stck.	$\phi$	L	8	10	12	22	25	28
1	2	28	4,45						8,90
2	2	25	6,20					12,40	
3	2	22	6,20				12,40		
4	1	10	6,20		6,20				
5	28	12	1,25			35,00			
6	32	8	1,25	40,00					
m:				40,00	6,20	35,00	12,40	12,40	8,90
kg:				16,0	40,0	31,0	37,0	48,0	43,0

179,0 kg St 42 / 50 RK

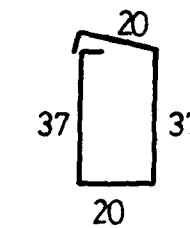
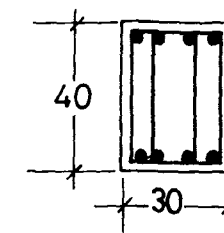
Bn 250 / St 42 / 50

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 25
Bewehrungsplan	Anlage 1.25



Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d

Querschnitt M 1:10



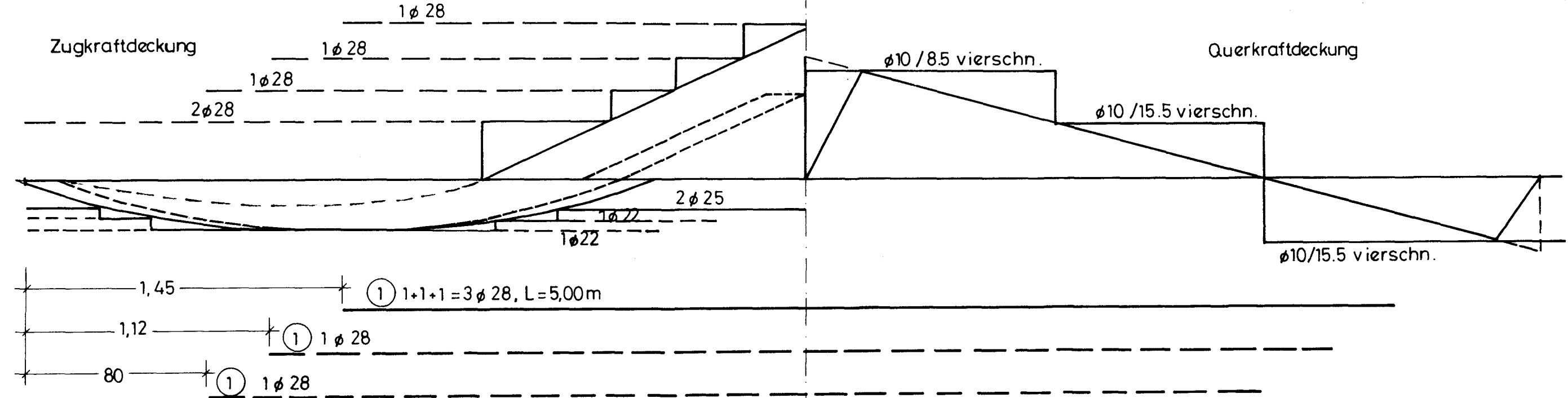
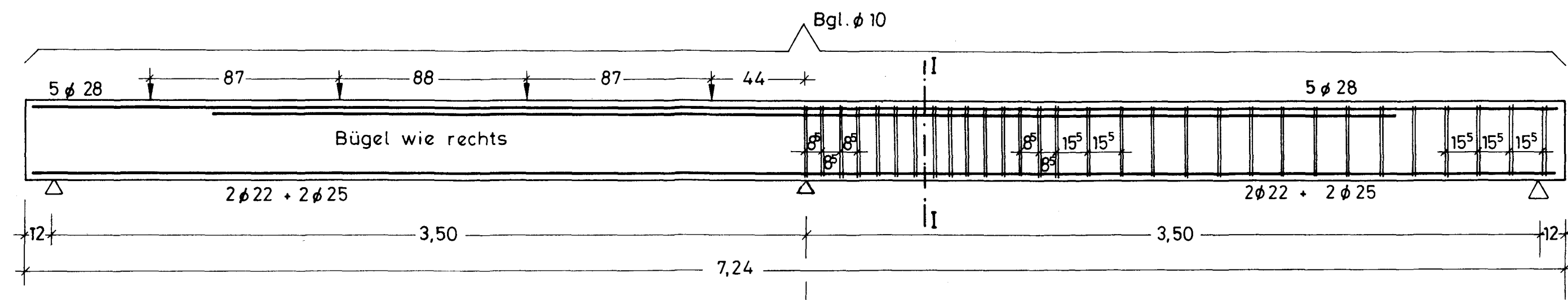
5 88 φ 10 L = 1,25 m

# Stahlliste

Nr.	Stck.	φ	L	10	20	28
1	2	28	4,50			9,00
2	2	28	5,20			10,40
3	2	20	2,40		4,80	
4	3	20	5,20		15,60	
5	88	10	1,25	110,00		
m:				110,00	20,40	19,40
kg:				68	51	94

213 kg St 42 / 50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 26
Bewehrungsplan	Anlage 1.26



② 2 ϕ 28, L = 7,20 m

③ 1+1 = 2 ϕ 22, L = 3,25 m

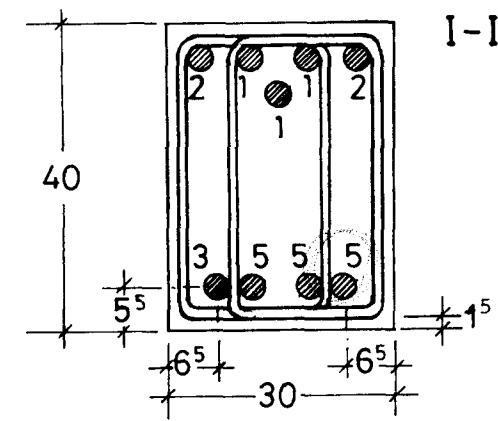
④ 1+1 = 2 ϕ 22, L = 3,00 m

⑤ 2 ϕ 25, L = 7,20 m

③ 1 ϕ 22

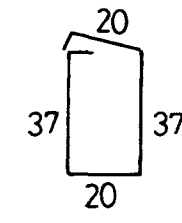
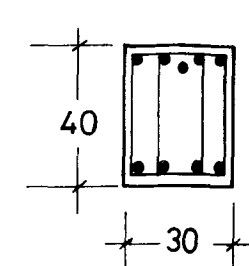
④ 1 ϕ 22

Pos. ④ fehlt  
im Feld 5



Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d

Querschnitt M 1:10



⑥ 116 ϕ 10 L = 1,25 m

Stahlliste

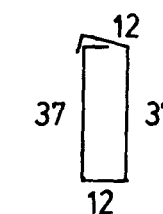
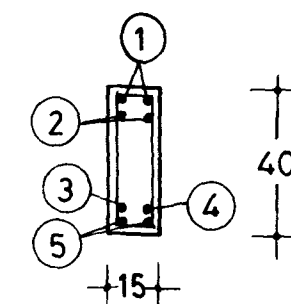
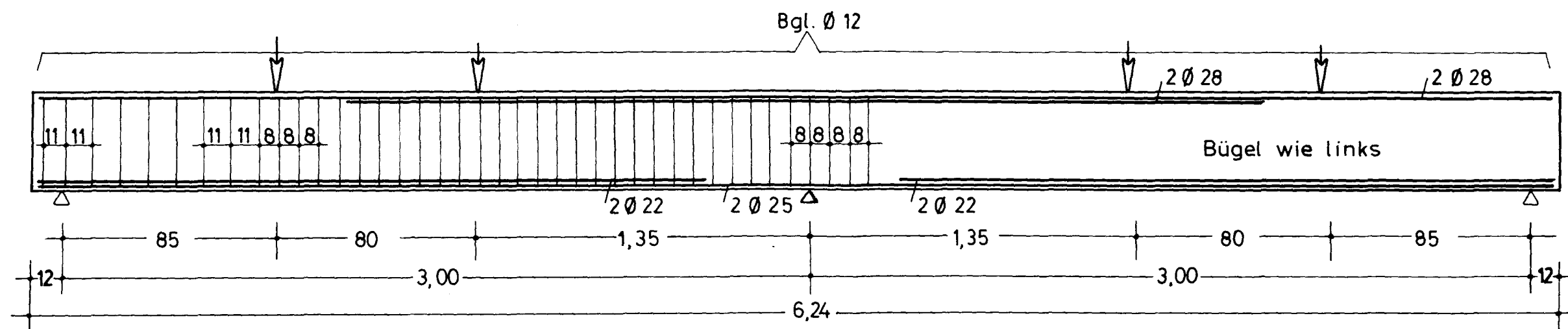
Nr.	Stck.	ϕ	L	10	22	25	28
1	3	28	5,00				15,00
2	2	28	7,20				14,40
3	2	22	3,25		6,50		
4	2	22	3,00		6,00		
5	2	25	7,20			14,40	
6	116	10	1,25	145,00			
m:				145,00	12,50	14,40	19,40
kg:				90,0	36,0	56,0	143,0

325 kg St 42 / 50 RK

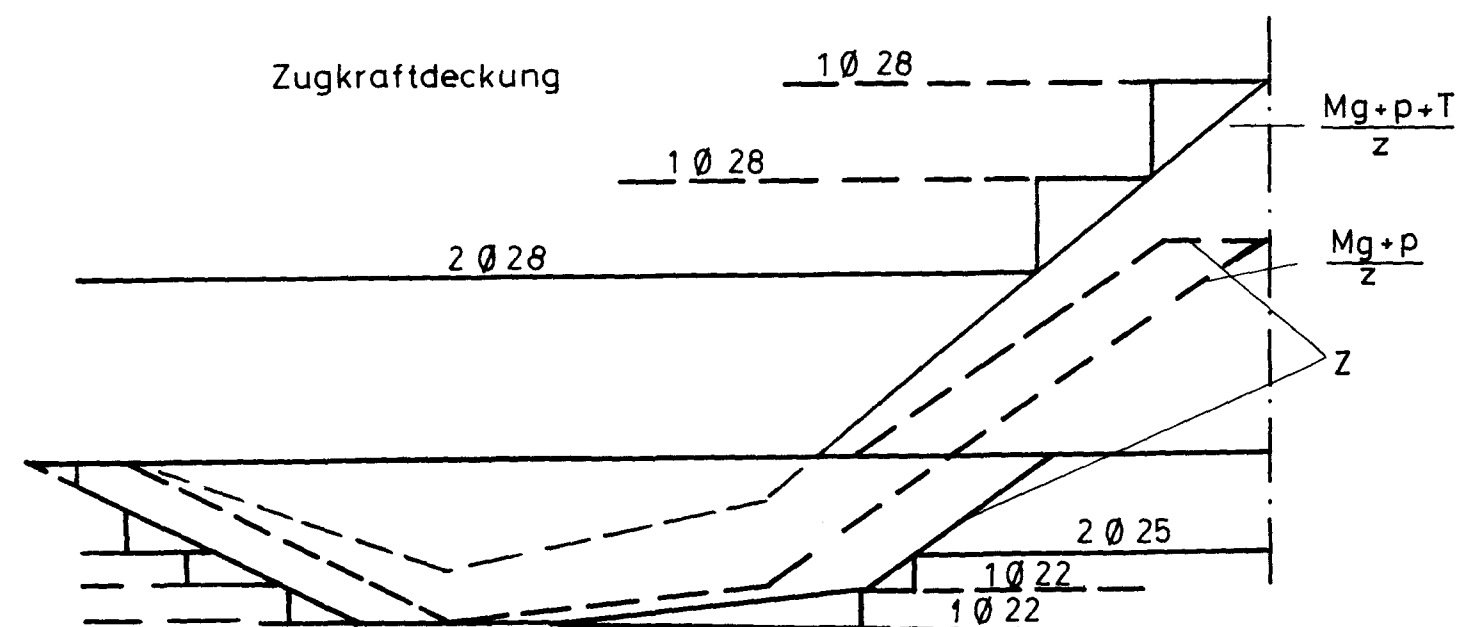
Bn 250 / St 42 / 50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 27
Bewehrungsplan	Anlage 1.27



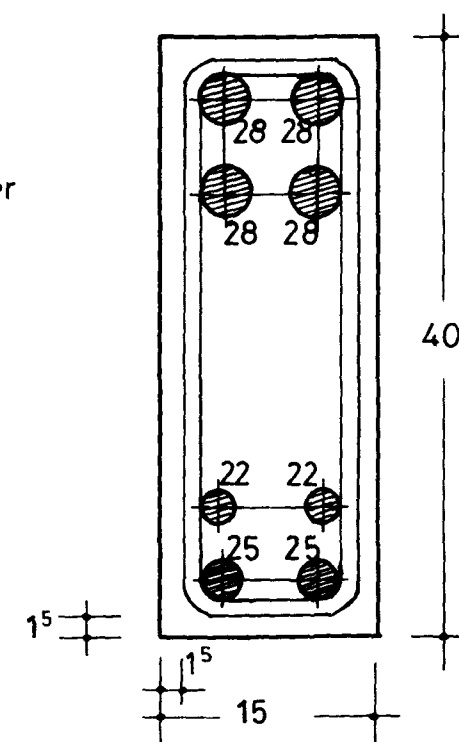


⑥ 72 Ø 12, L = 1,10 m



Biegerollendurchmesser  
der Bügel: 5d

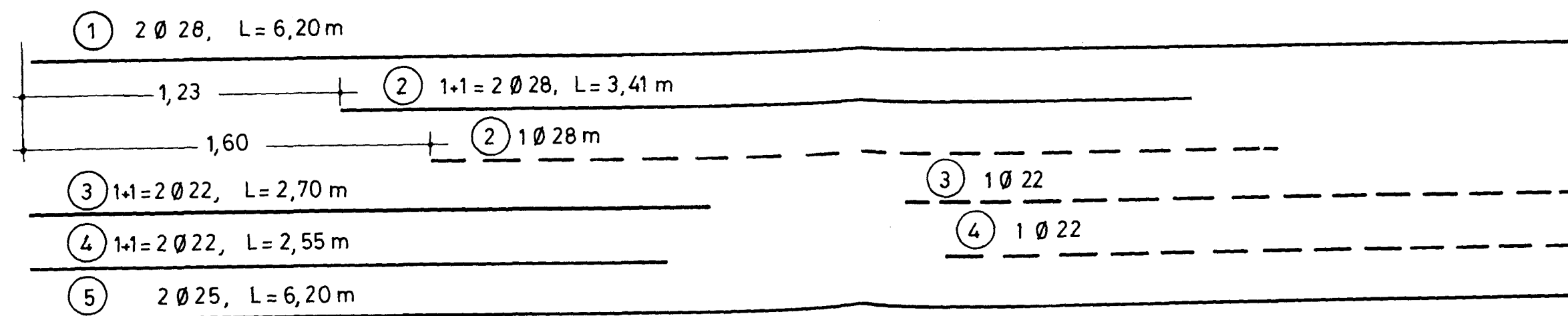
Querschnitt M1:5



### Stahlliste

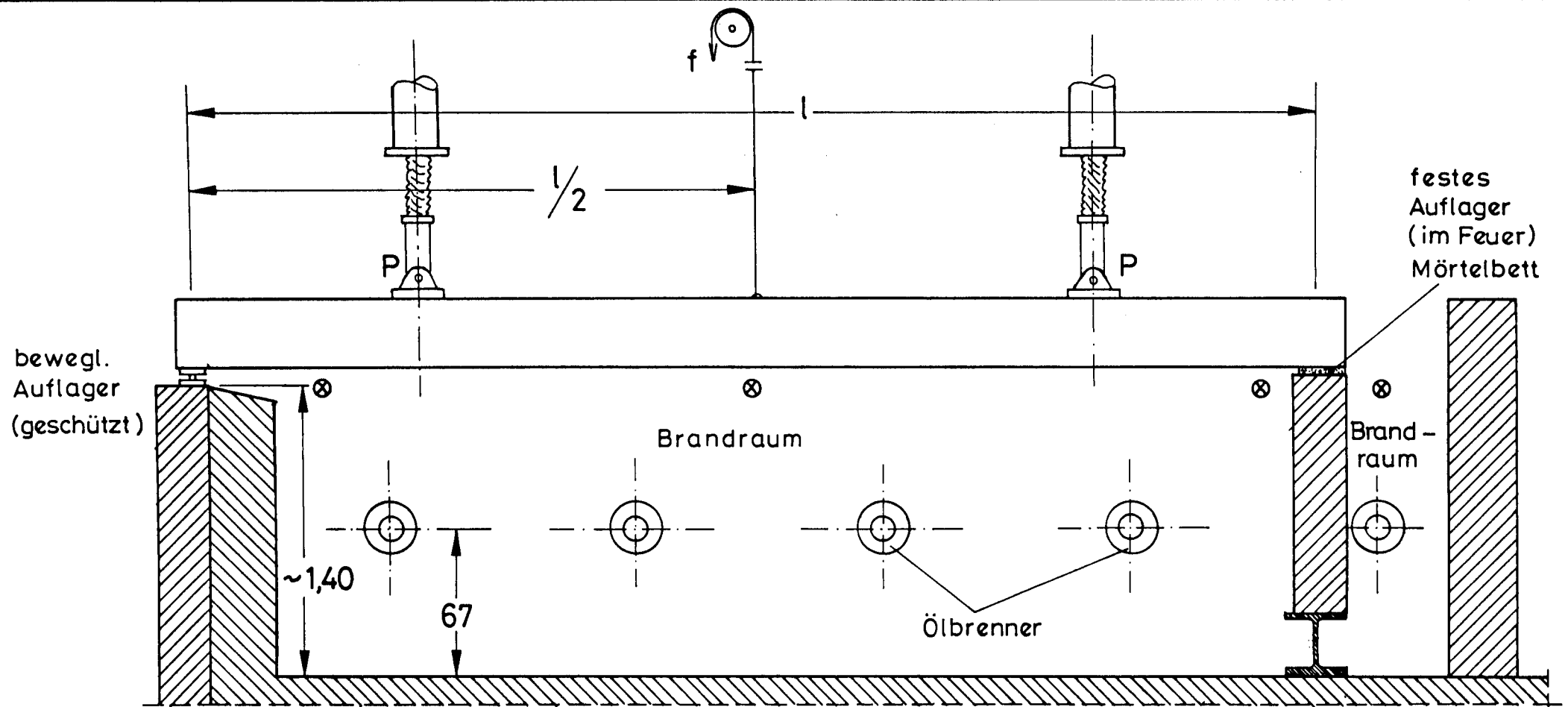
Nr.	Stck.	Ø	L	12	22	25	28
1	2	28	6,20				12,40
2	2	28	3,41				6,82
3	2	22	2,70		5,40		
4	2	22	2,55		5,10		
5	2	25	6,20			12,40	
6	72	12	1,10	79,50			
m:				79,20	10,50	12,40	19,22
kg:				71	32	48	93

244 kg St. 42 / 50 RK



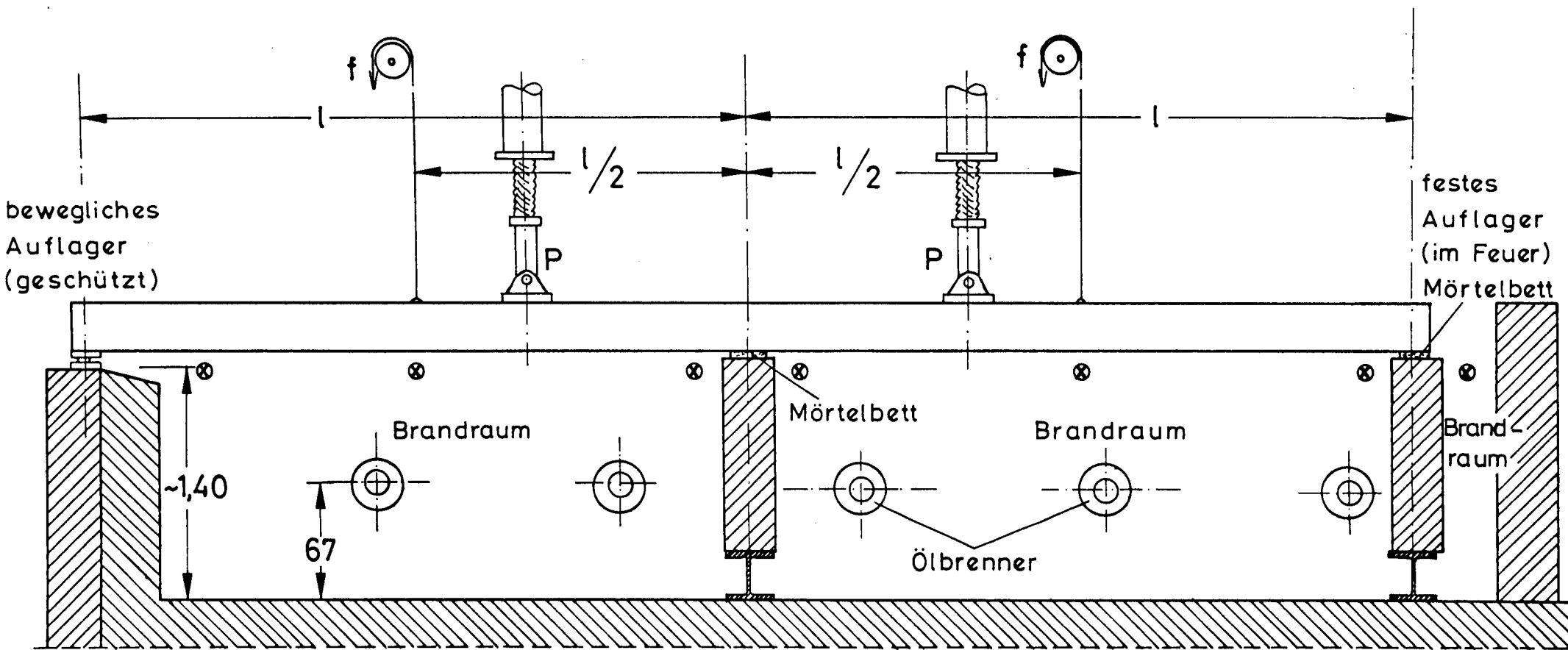
Bn 450 / St 42 / 50 RK

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 28
Bewehrungsplan	Anlage 1.28



Brandraumabdeckung und  
Isolierung der Stahlteile  
nicht dargestellt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer		
Prinzip des Versuchsaufbaus , Einfeldsystem		Anlage 2.1
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau		
Technische Universität Braunschweig		
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen		

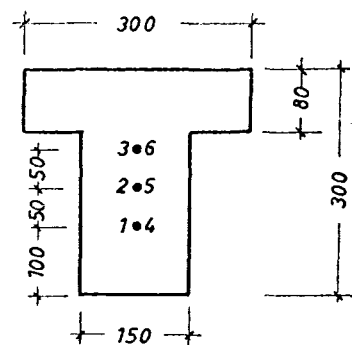


⊗ Messung der Brandraumtemperatur

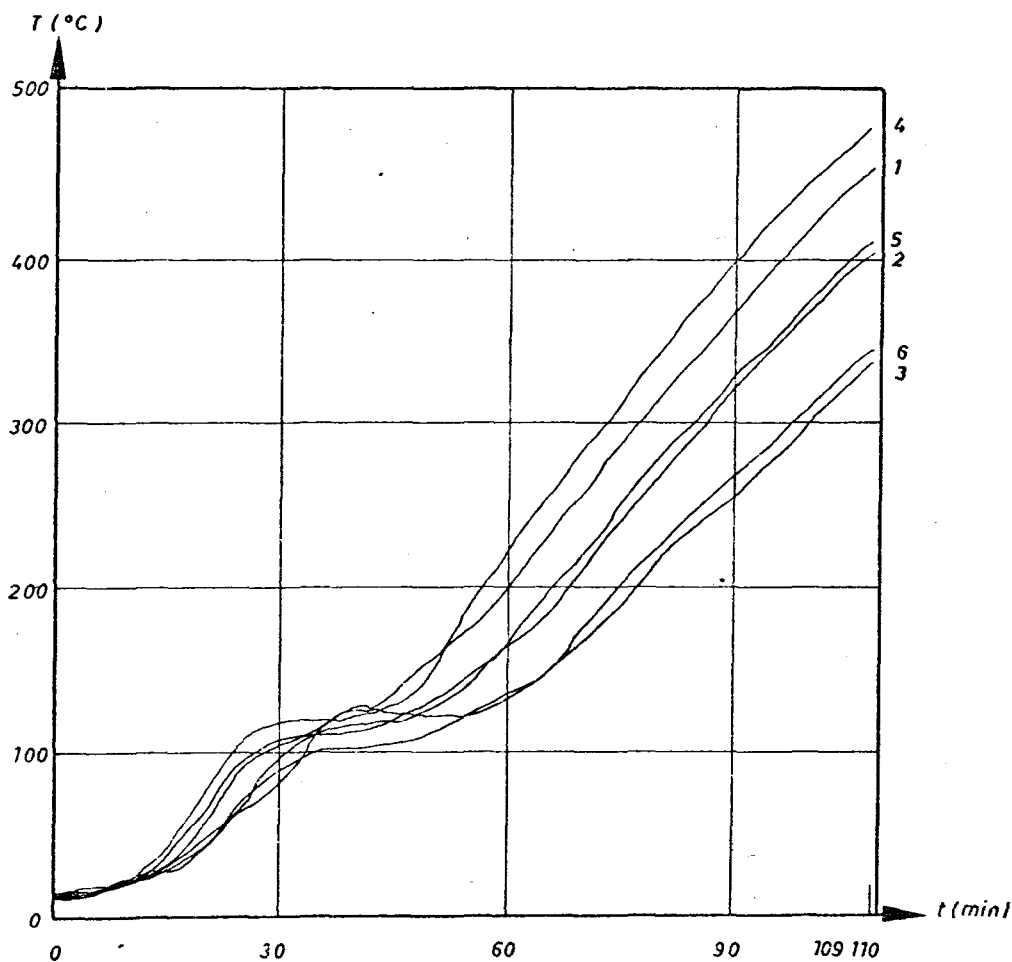
Brandraumabdeckung und  
Isolierung der Stahlteile  
nicht dargestellt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer		
Prinzip des Versuchsaufbaus , Zweifeldsystem		Anlage 2.2
Institut für Baustellkunde und Stahlbetonbau		
Technische Universität Braunschweig		
Amtliche Materialprüfstelle für das Bauwesen		

Anordnung der Meßstellen im Querschnitt

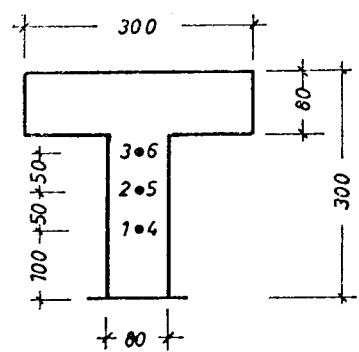


Meßstellen 1-3 über dem Auflager  
Meßstellen 4-6 in Feldmitte



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 6
Temperaturverlauf im Beton	Anlage 3.6
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

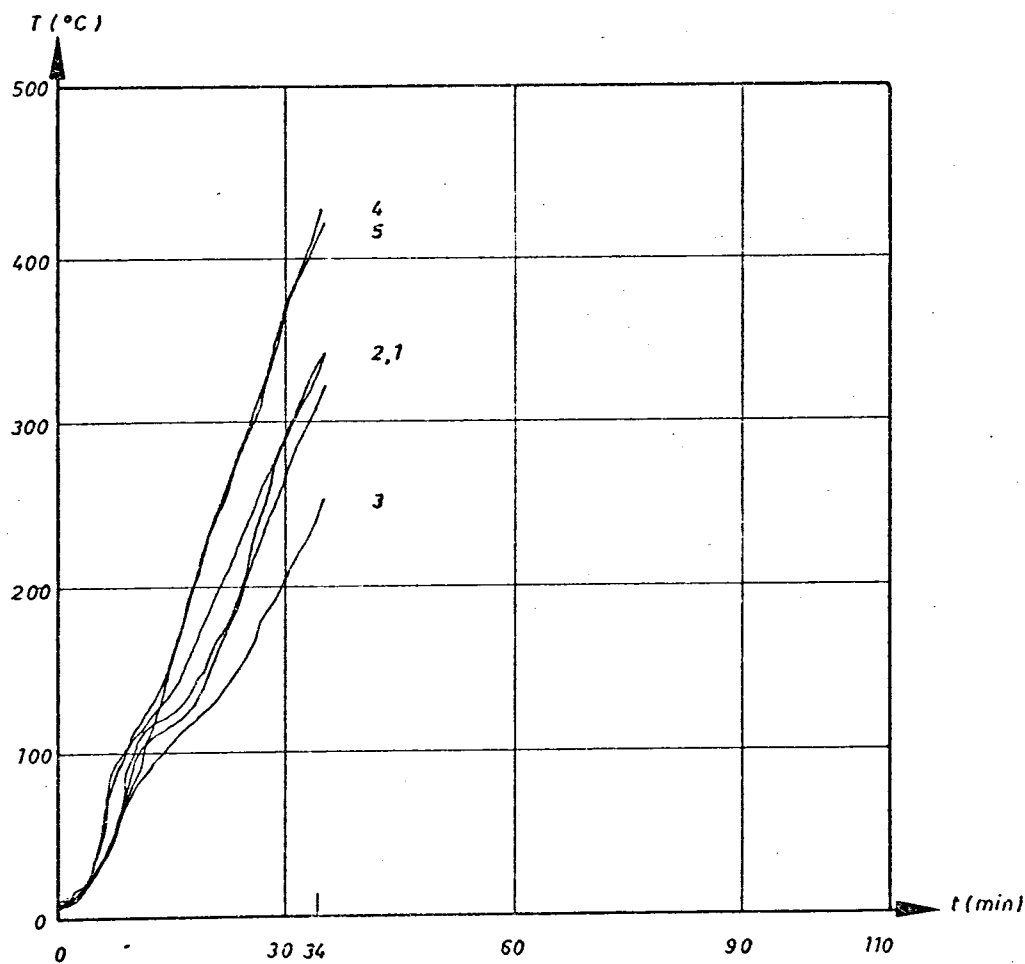
Anordnung der Meßstellen im Querschnitt



Meßstellen 1-3 über dem Auflager

Meßstellen 4-6 in Feldmitte

Meßstelle 6 ausgefallen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

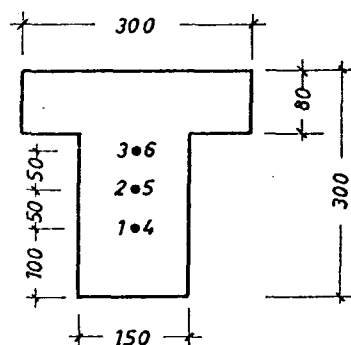
Balken 7

Temperaturverlauf im Beton

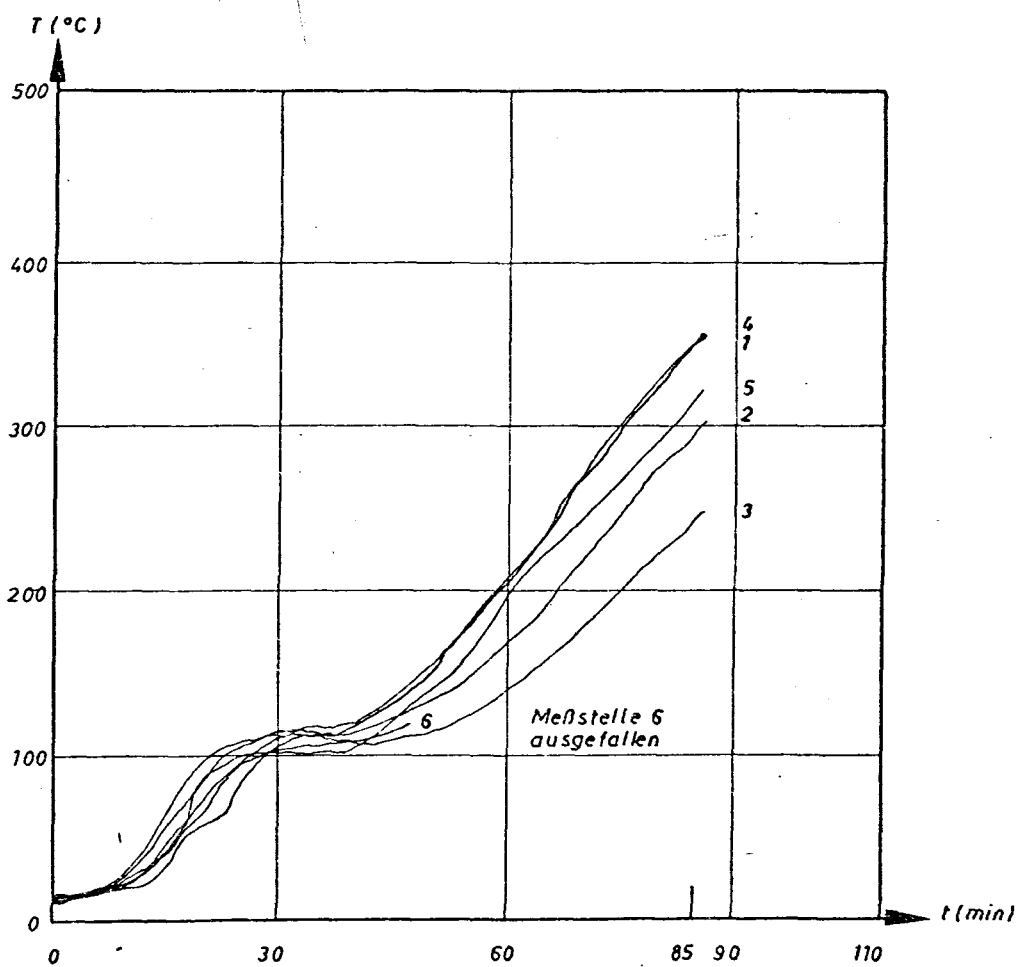
Anlage 3.7

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anordnung der Meßstellen im Querschnitt



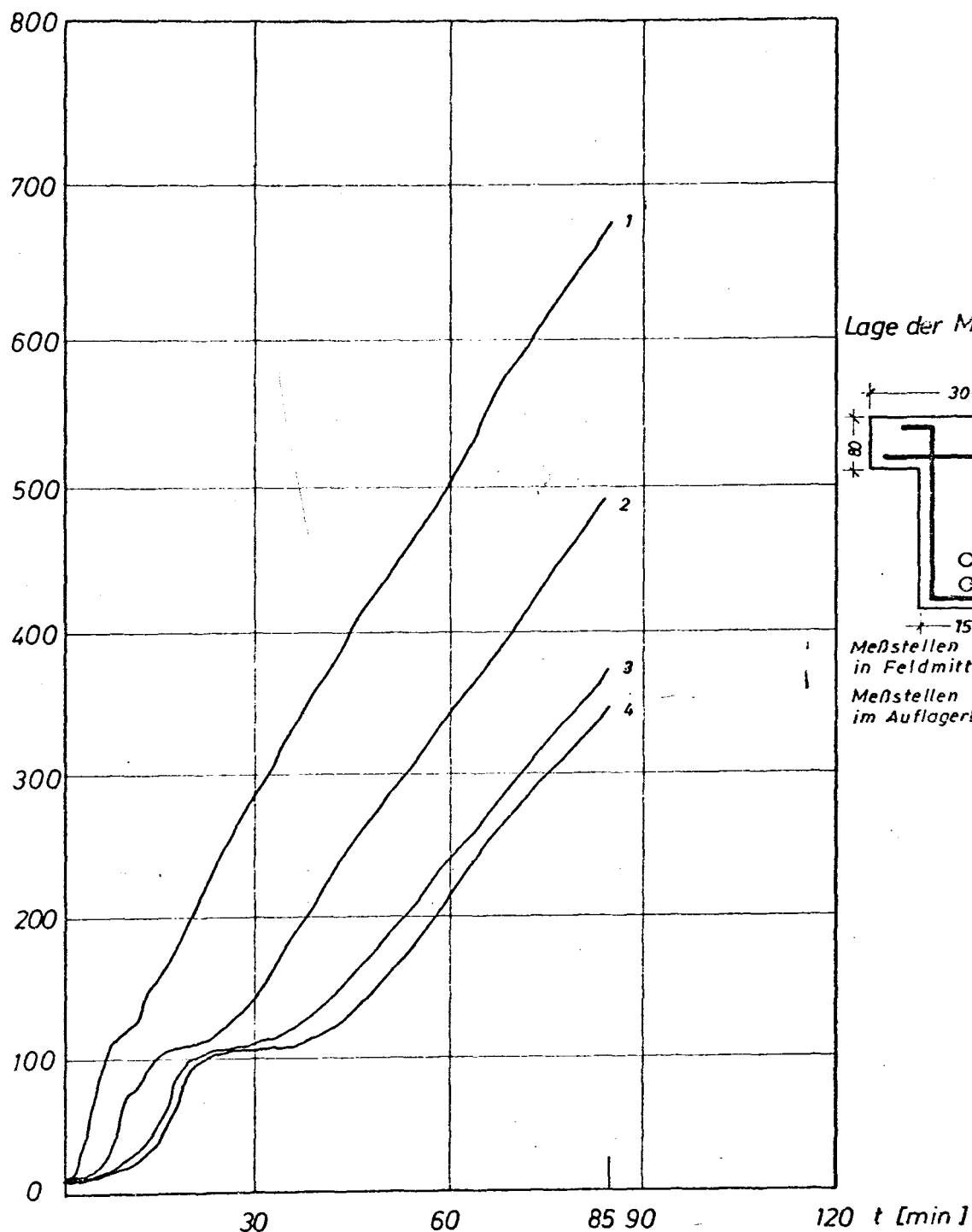
Meßstellen 1-3 über dem Auflager  
Meßstellen 4-6 in Feldmitte



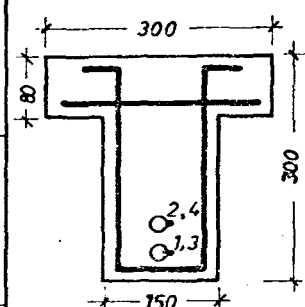
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 8
Temperaturverlauf im Beton	Anlage 3.8
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



$T [^{\circ}\text{C}]$



Lage der Meßstellen



Meßstellen 1 und 2  
in Feldmitte

Meßstellen 3 und 4  
im Auflagerbereich

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

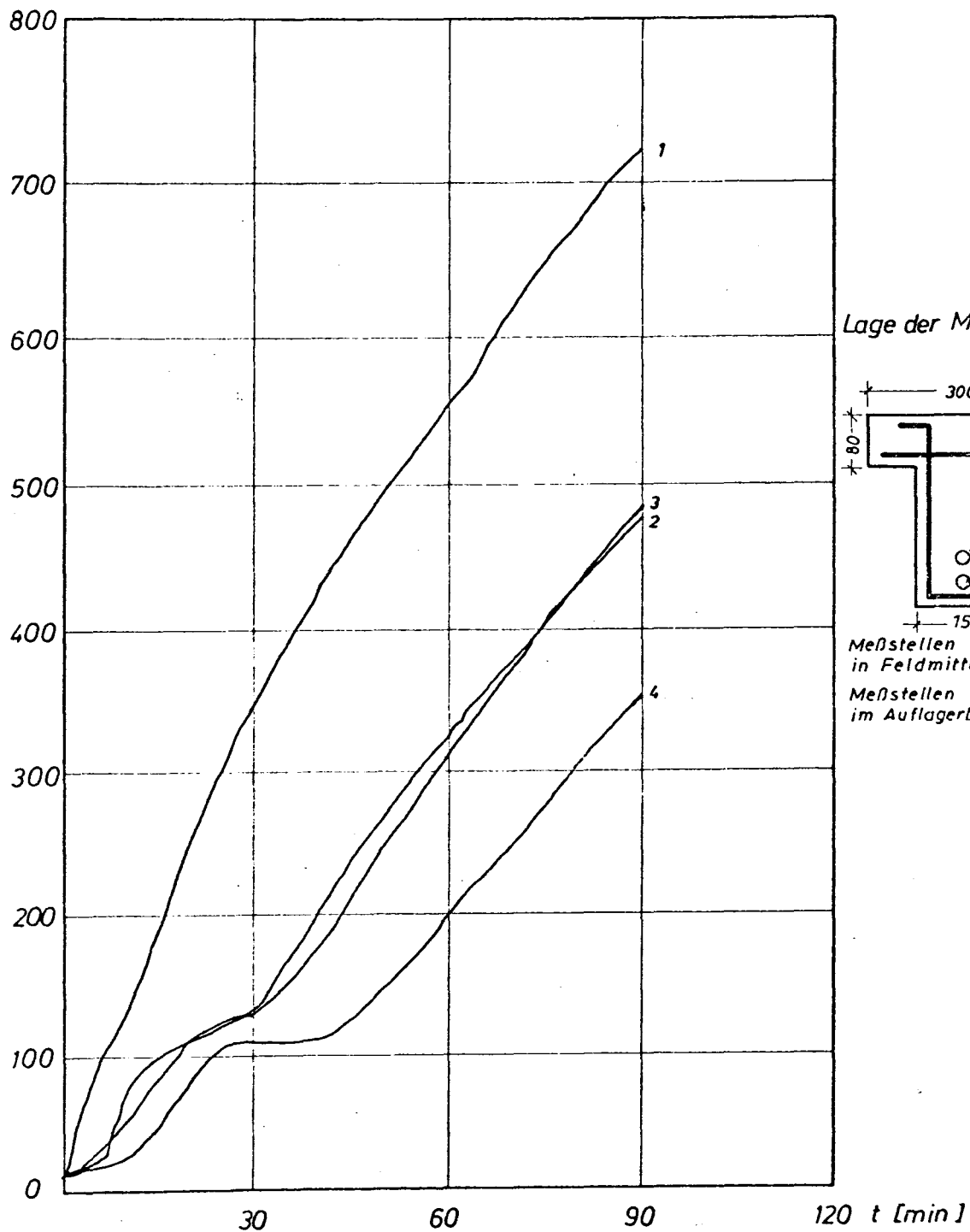
Balken 1

Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

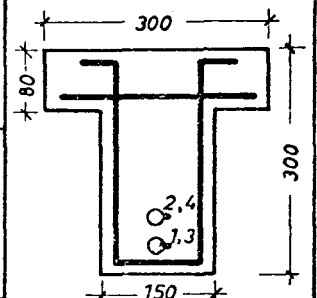
Anlage 4.1

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

$T [^{\circ}\text{C}]$



Lage der Meßstellen



Meßstellen 1 und 2  
in Feldmitte

Meßstellen 3 und 4  
im Auflagerbereich

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

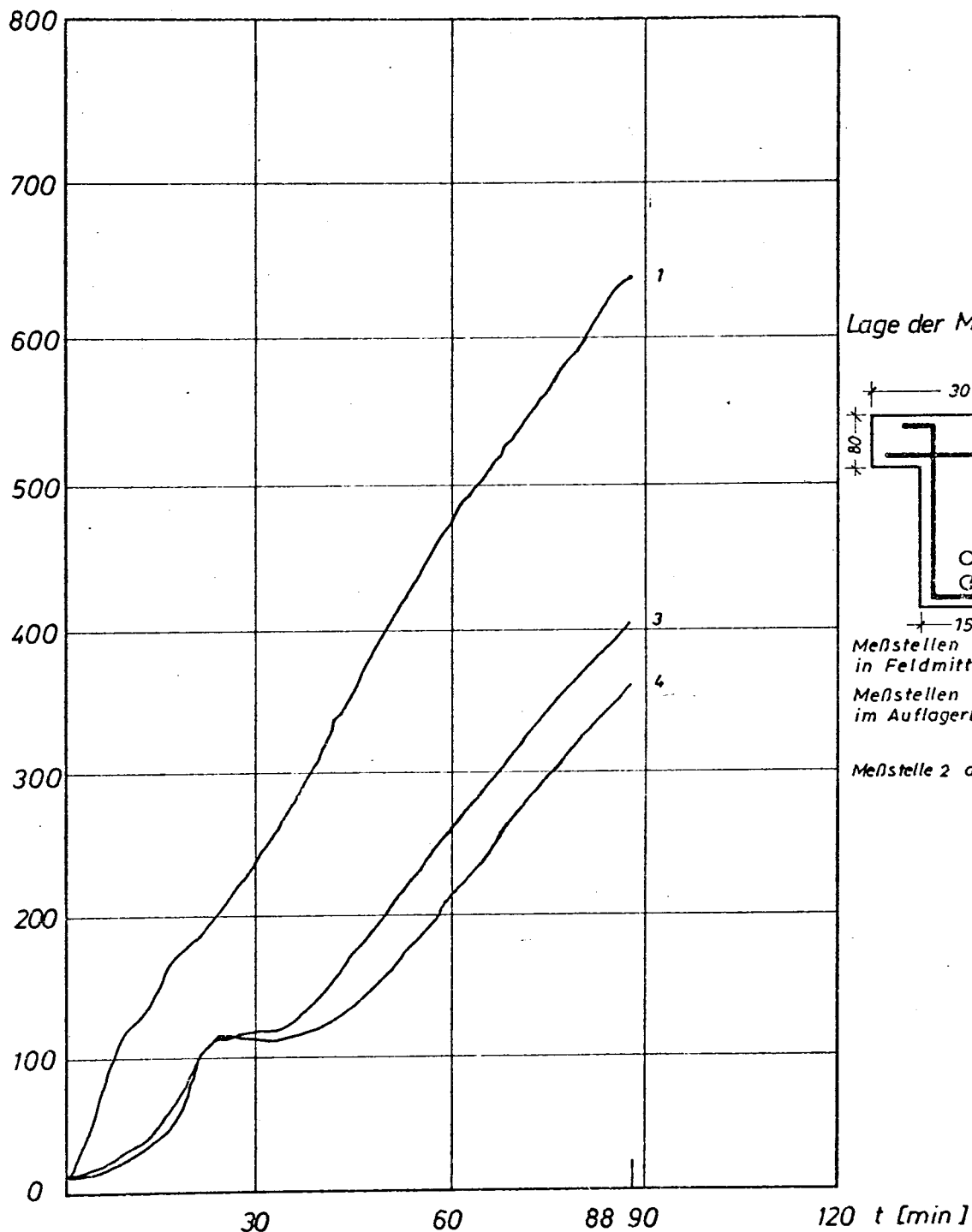
Balken 2

Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

Anlage 4.2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

$T [^{\circ}\text{C}]$



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

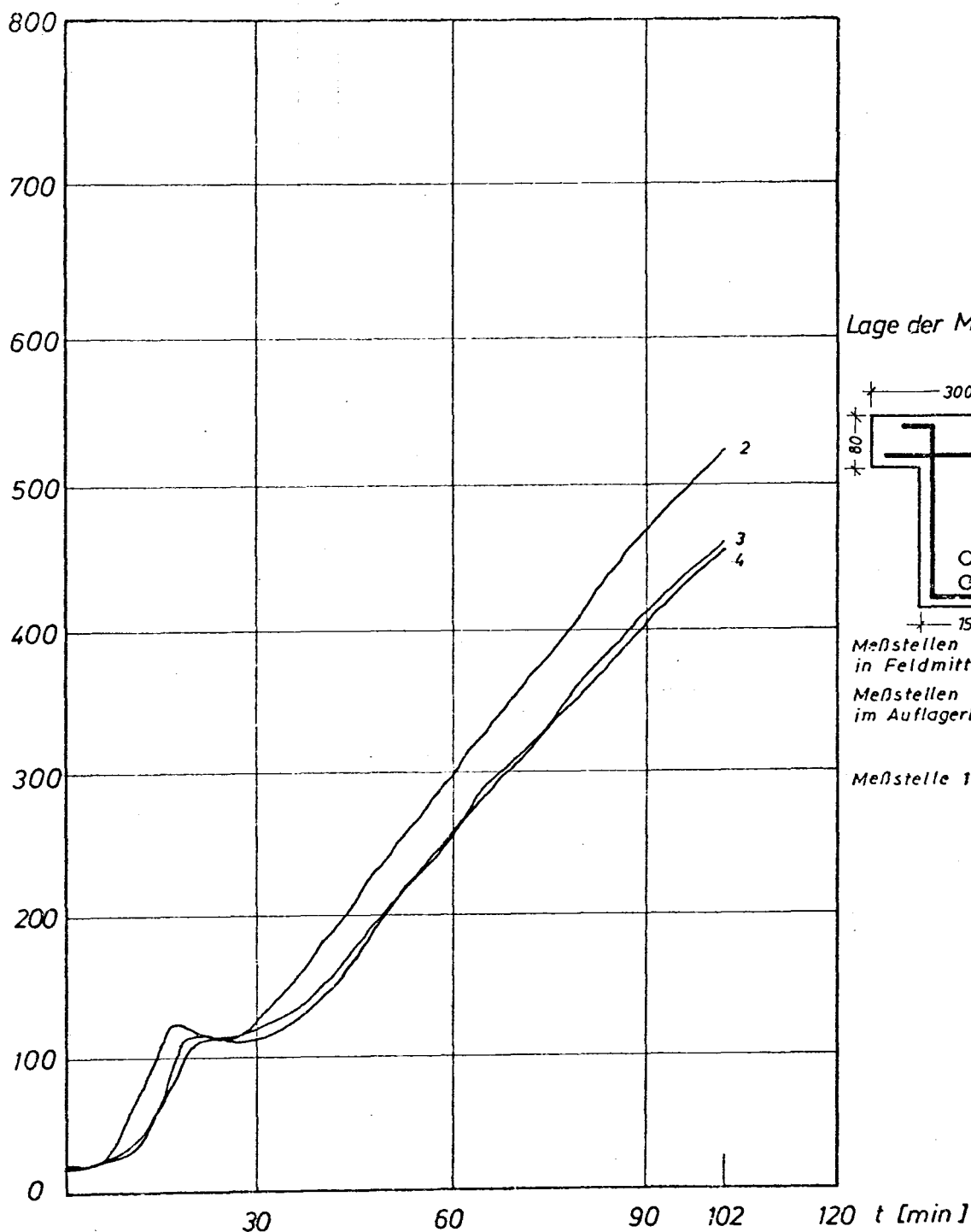
Balken 3

Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

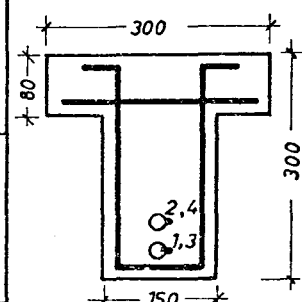
Anlage 4.3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

$T [^{\circ}\text{C}]$



Lage der Meßstellen



Meßstellen 1 und 2  
in Feldmitte

Meßstellen 3 und 4  
im Auflagerbereich

Meßstelle 1 ausgefallen

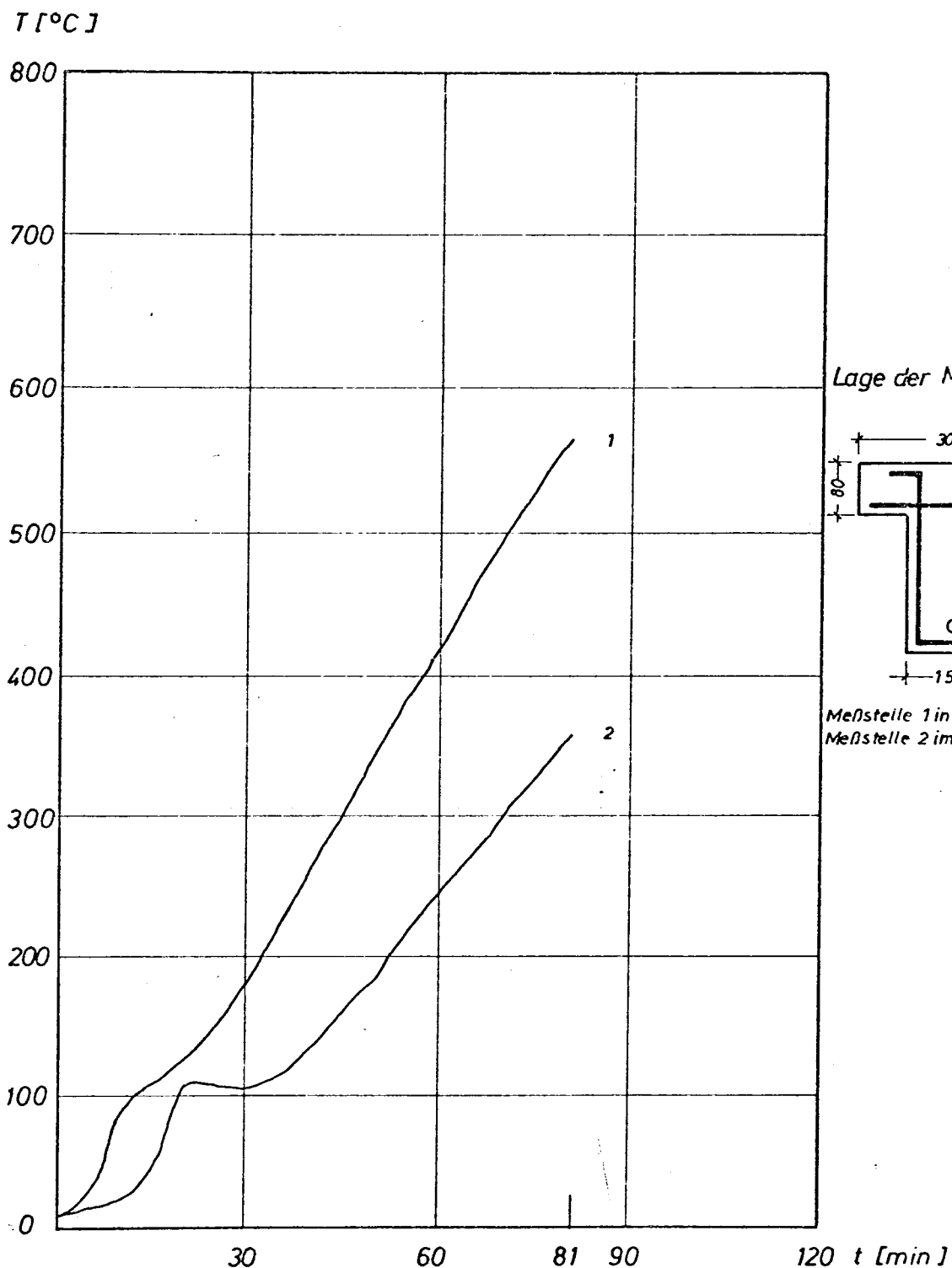
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 4

Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

Anlage 4.4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

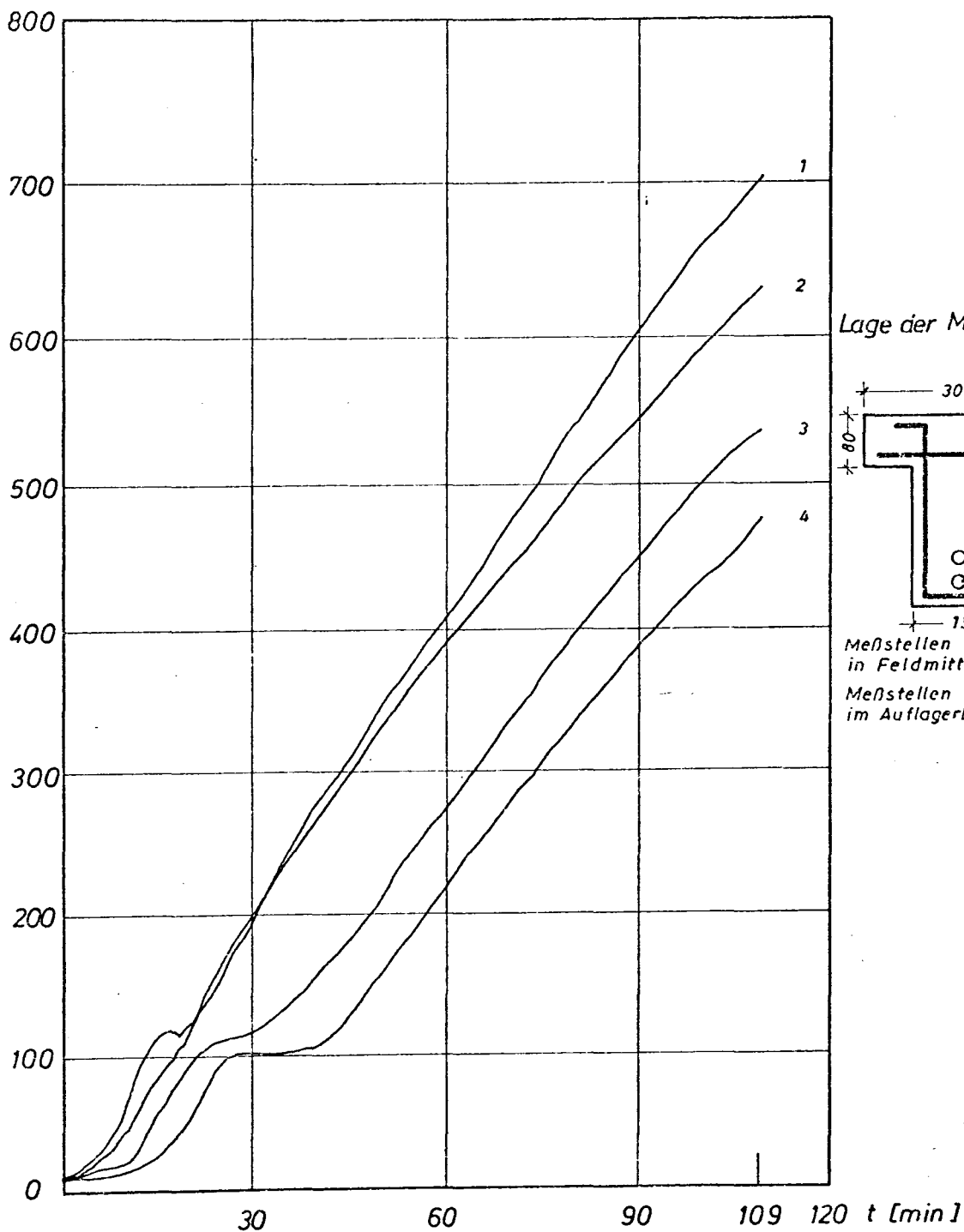
Balken 5

Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

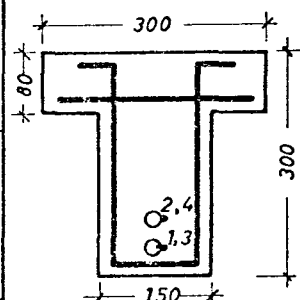
Anlage 4.5

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

$T [^{\circ}\text{C}]$



Lage der Meßstellen



Meßstellen 1 und 2  
in Feldmitte

Meßstellen 3 und 4  
im Auflagerbereich

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 6

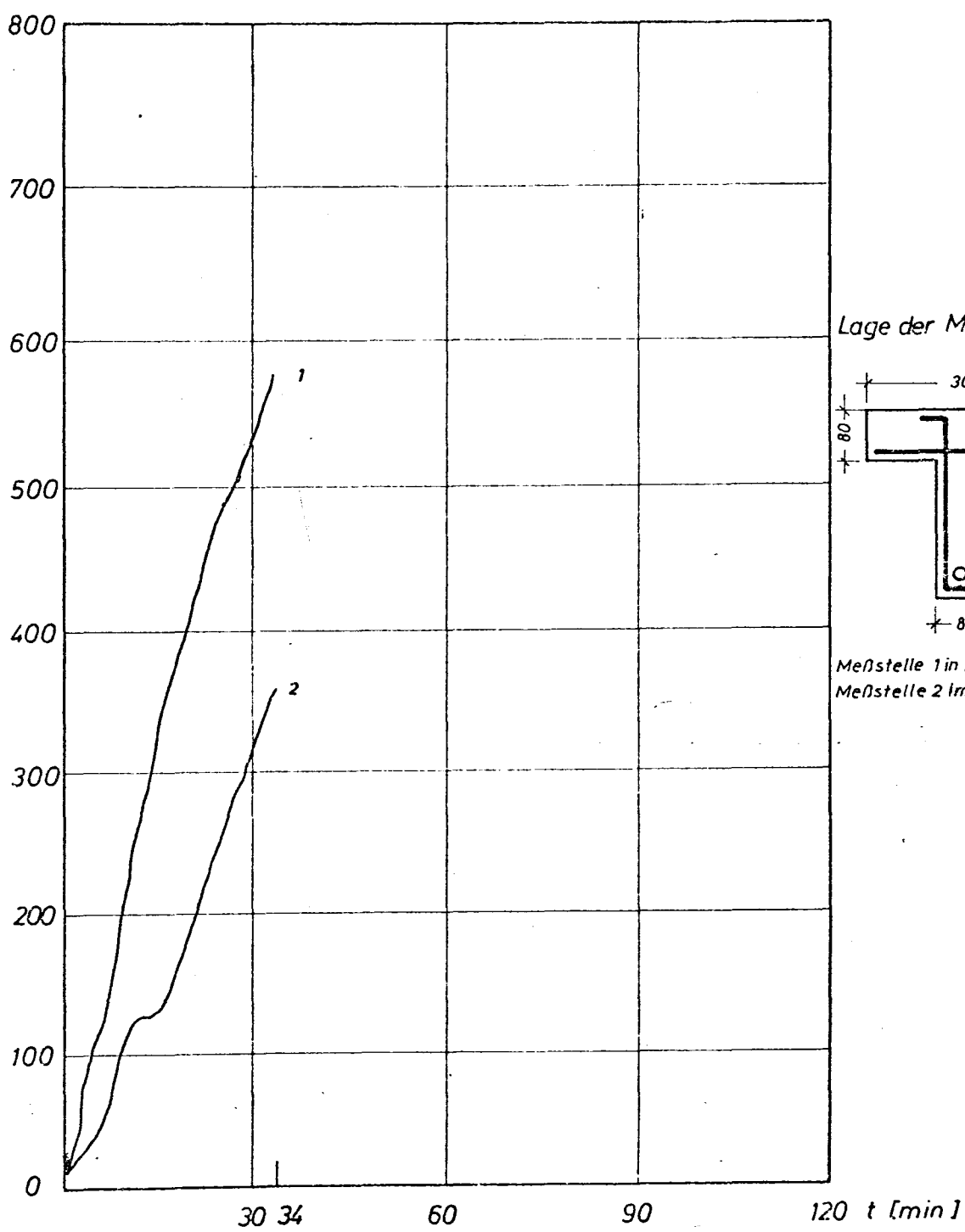
Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

Anlage 4.6

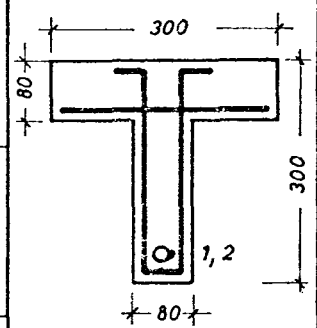
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



$T [^{\circ}\text{C}]$



Lage der Meßstellen



Meßstelle 1 in Feldmitte  
Meßstelle 2 im Auflagerber.

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

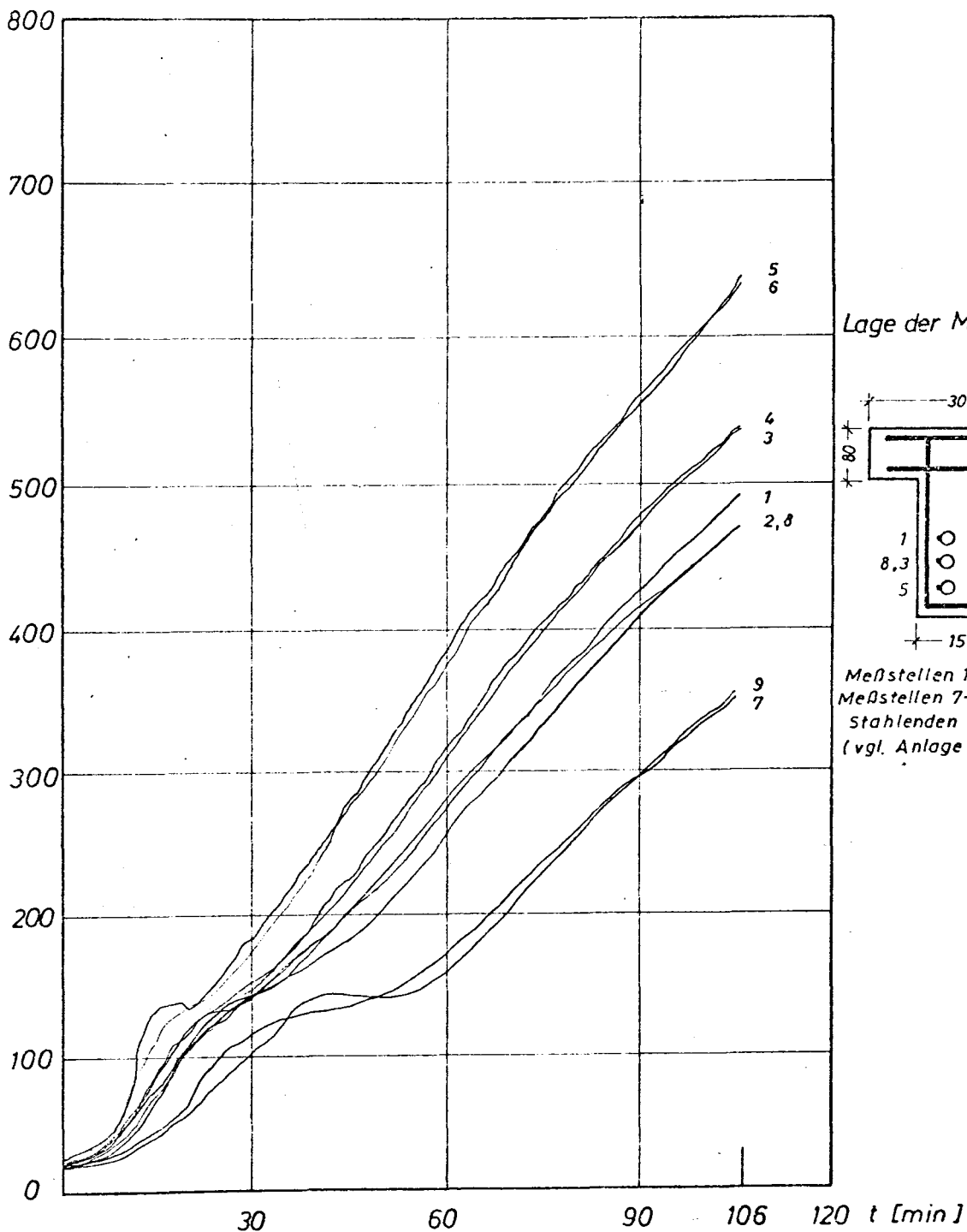
Balken 7

Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

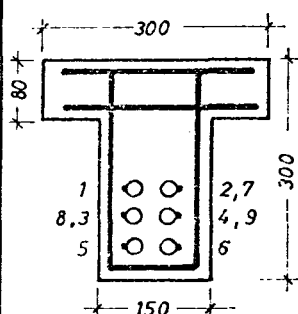
Anlage 4.7

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

$T [^{\circ}\text{C}]$



Lage der Meßstellen



Meßstellen 1-6 in Feldmitt  
Meßstellen 7-9 an den  
Stahlenden  
(vgl. Anlage 1...)

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

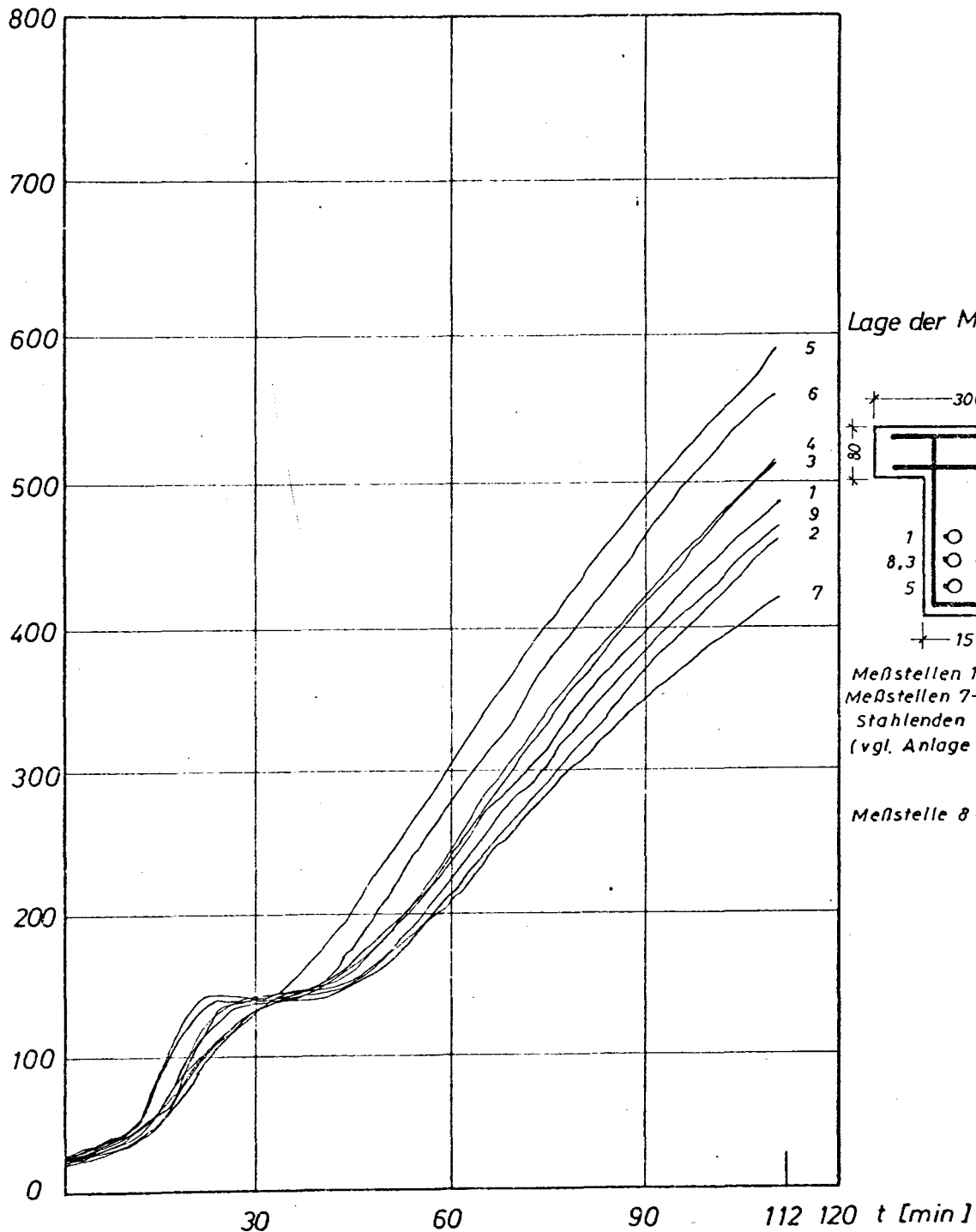
Balken 13

Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

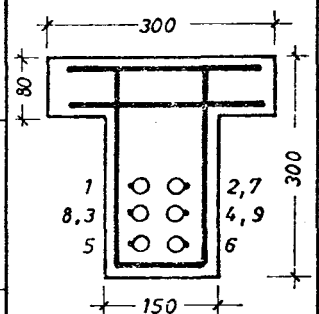
Anlage 4.13

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

$T [^{\circ}\text{C}]$



Lage der Meßstellen



Meßstellen 1-6 in Feldmitte  
Meßstellen 7-9 an den  
Stahlenden  
(vgl. Anlage 1...)

Meßstelle 8 ausgefallen

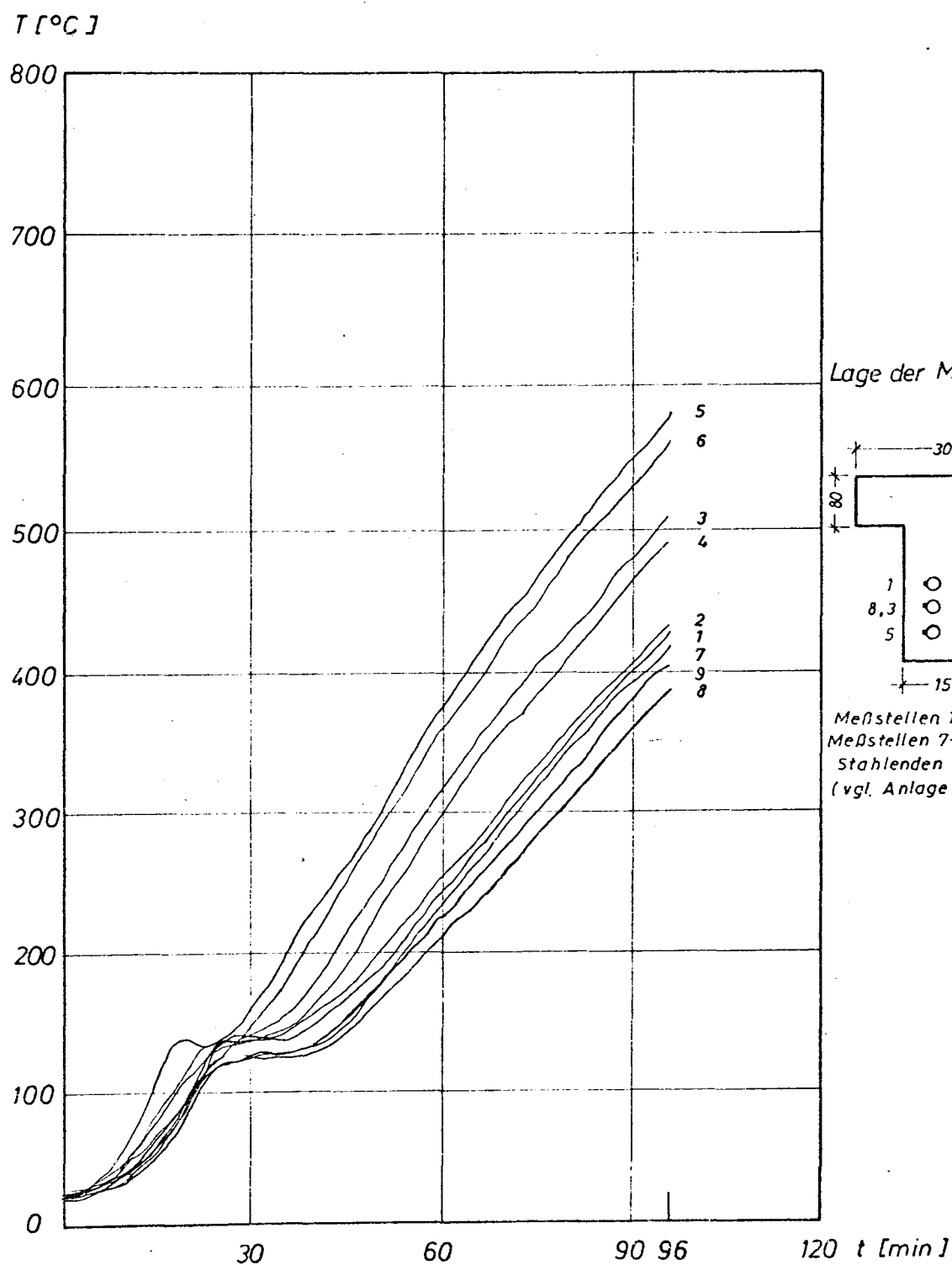
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 14

Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

Anlage 4.14

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

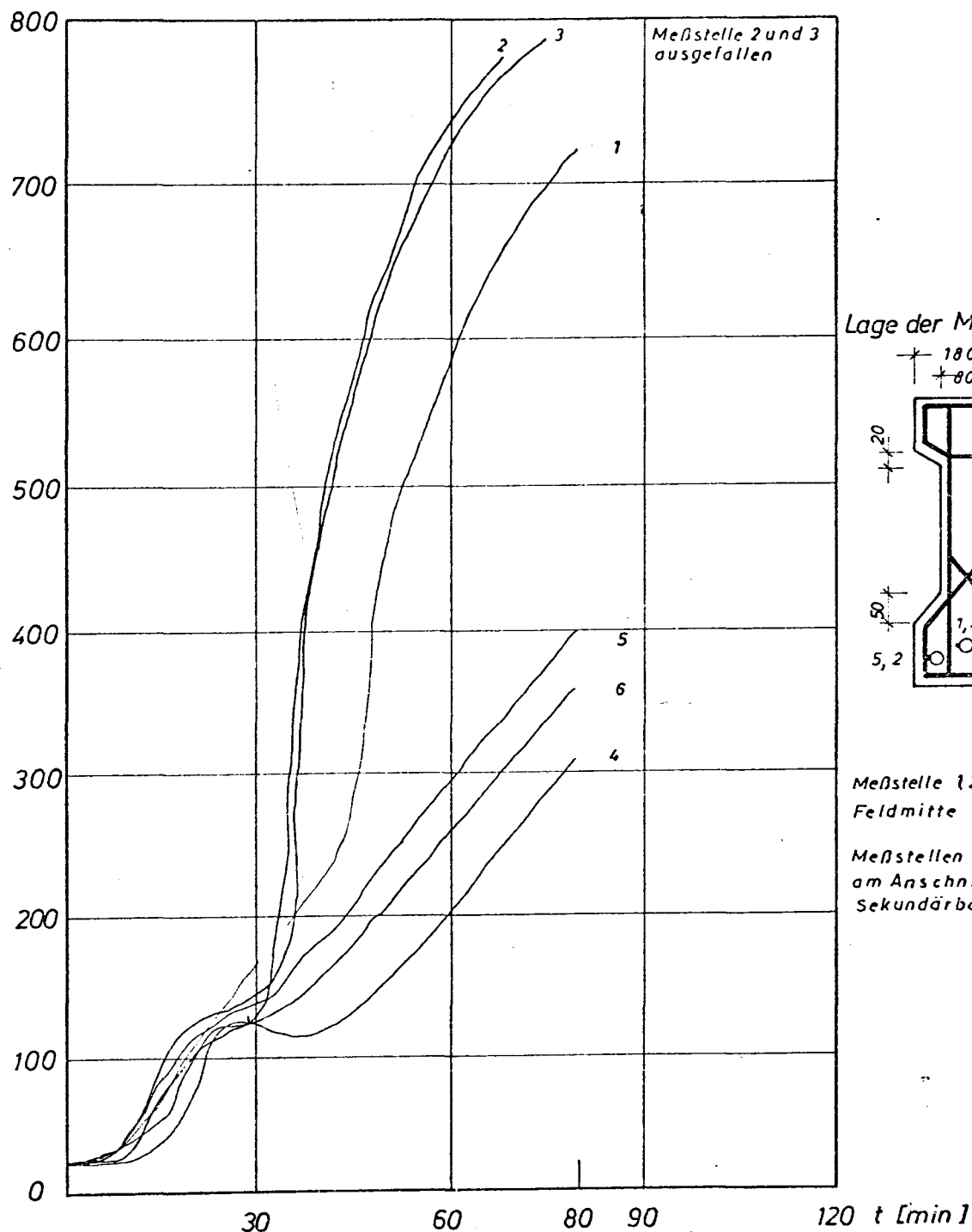
Balken 15

Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

Anlage 4.15

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

$T [^{\circ}\text{C}]$



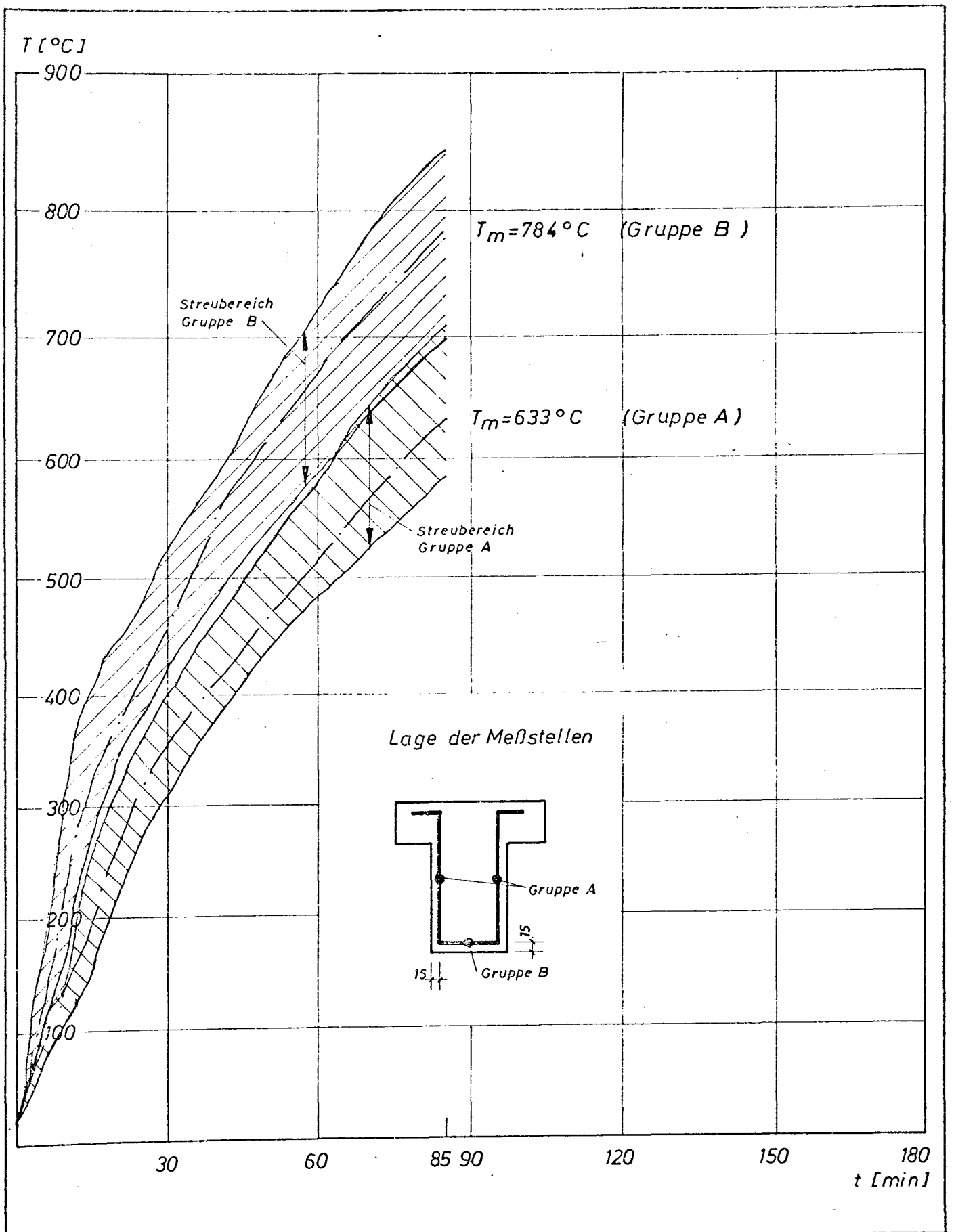
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 18

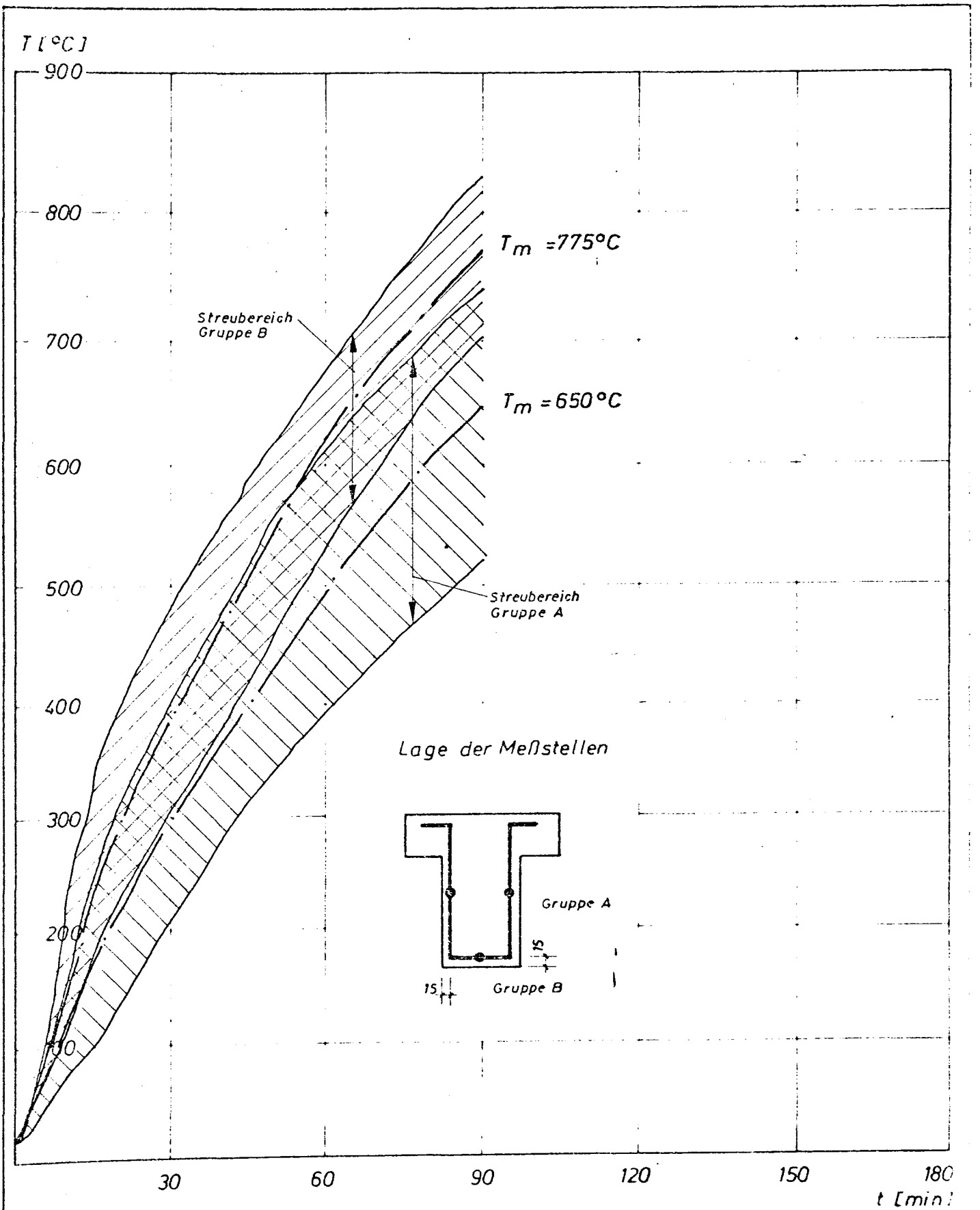
Temperaturverlauf an der Biegezugbewehrung

Anlage 4.18

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer		Balken 1
Temperaturverlauf an den Bügeln		Anlage 5.1
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen		



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

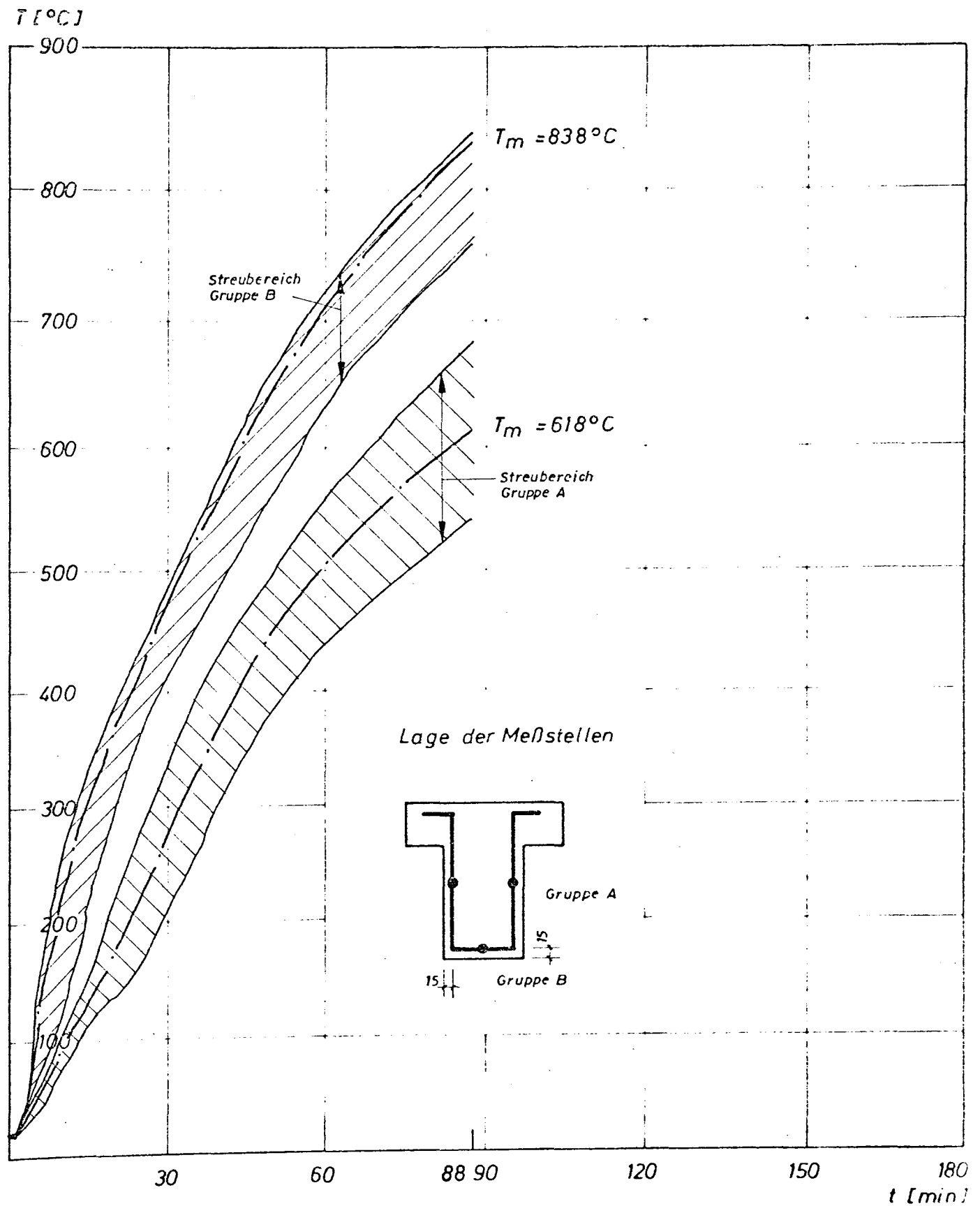
Balken 2

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen





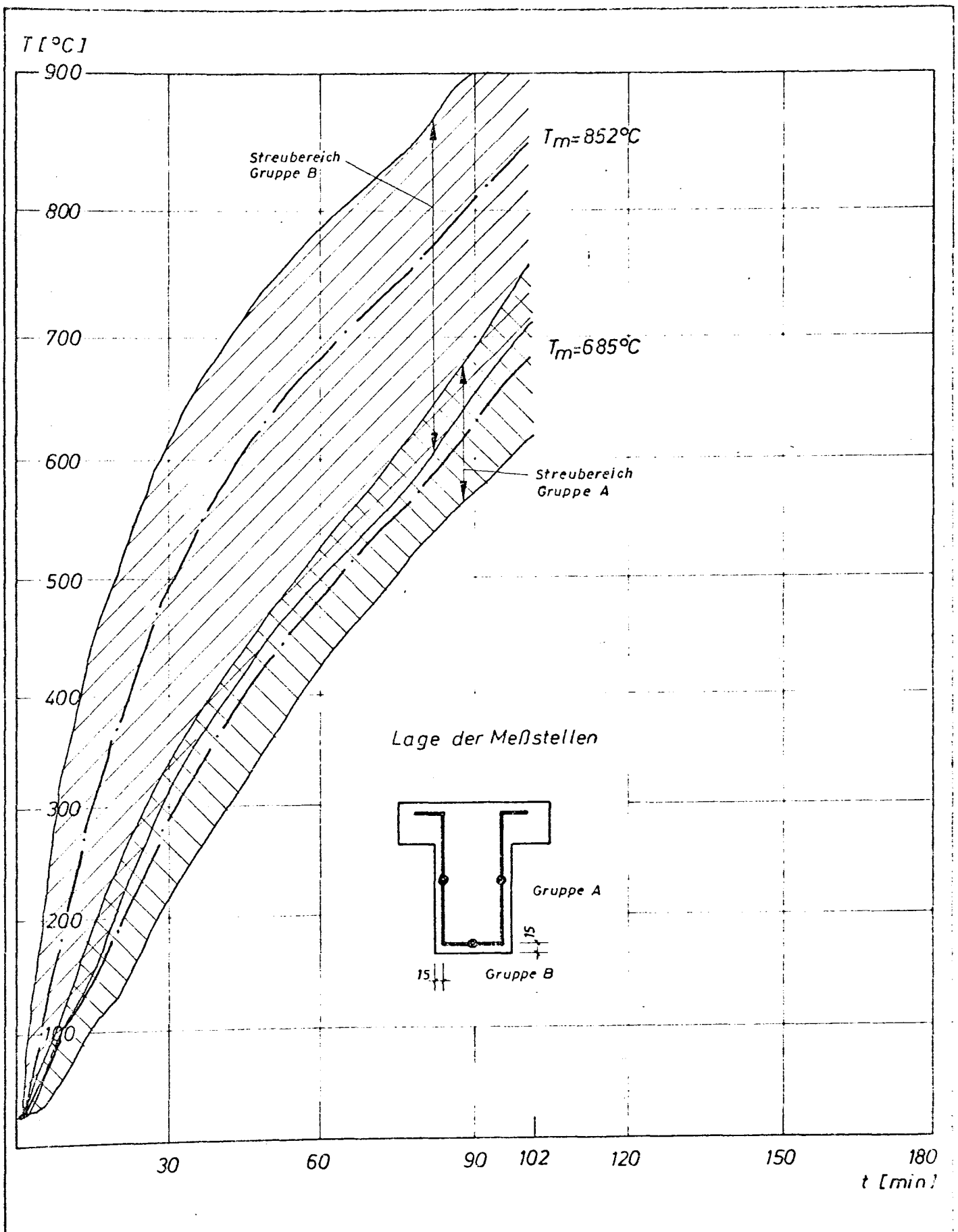
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 3

Temperaturverlauf an den Bügeln - -

Anlage 5.3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Mittliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

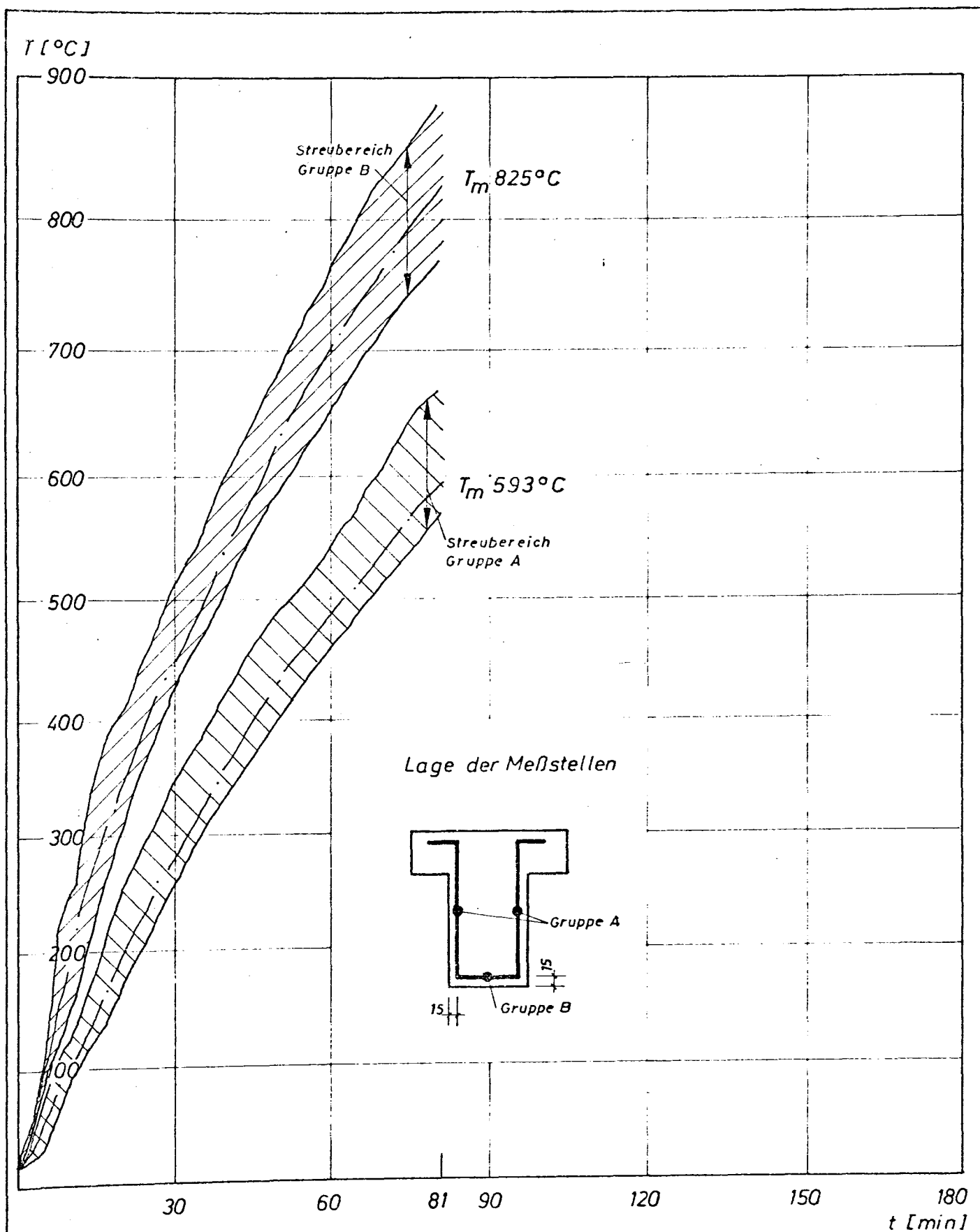
Balken 4

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

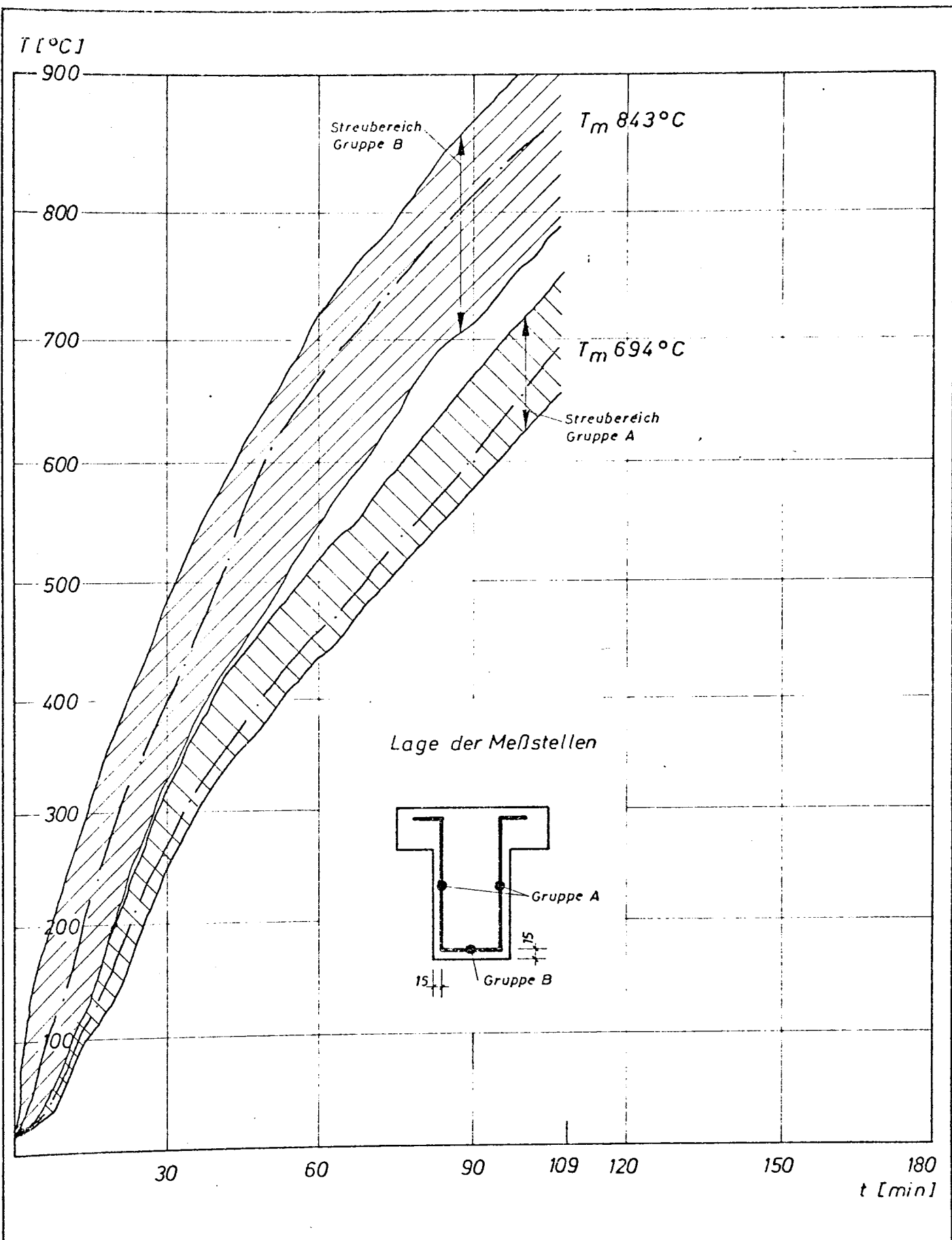
Balken 5

Temperaturverlauf an den Bügeln

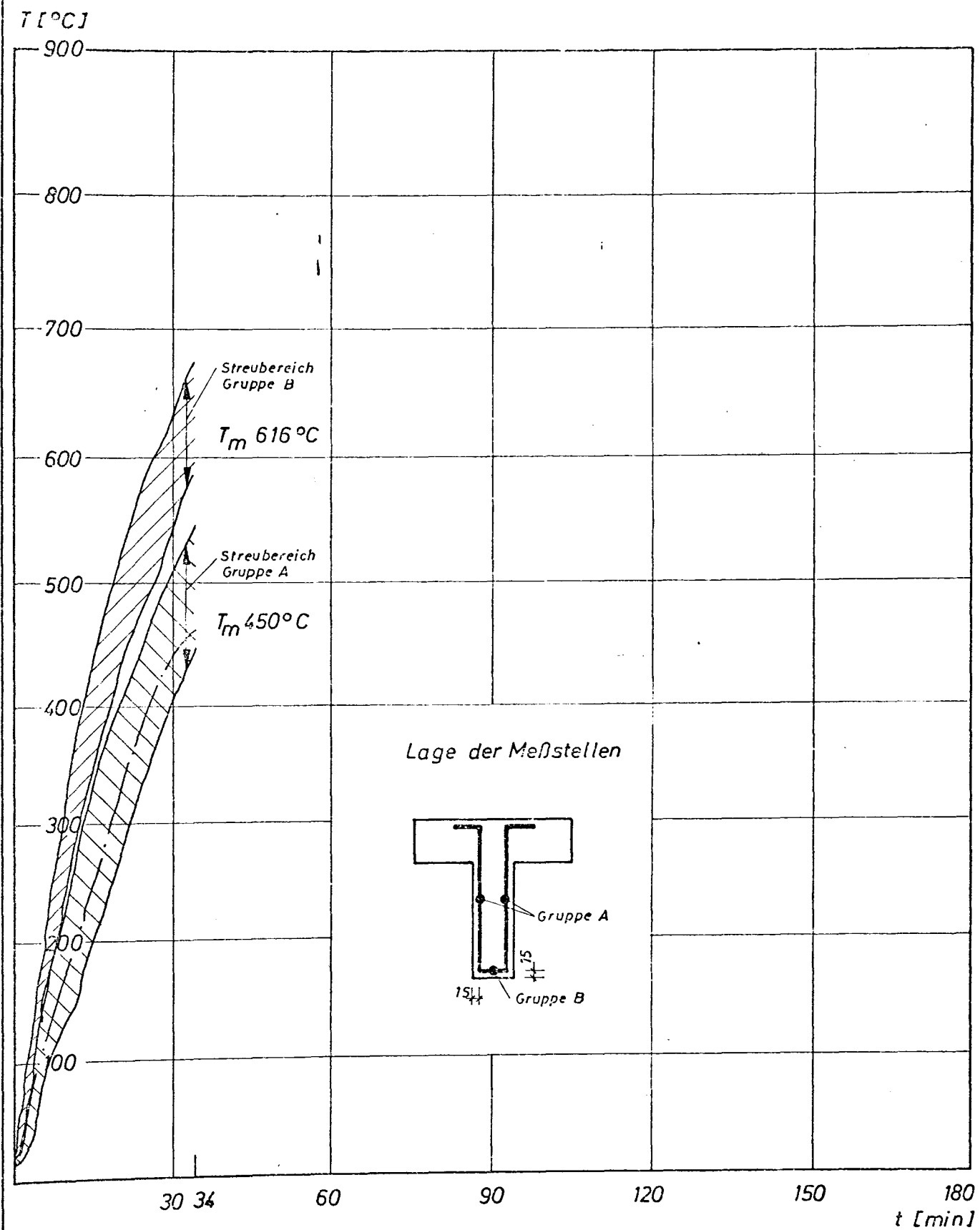
Anlage 5.5

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 6
Temperaturverlauf an den Bügeln	Anlage 5.6
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



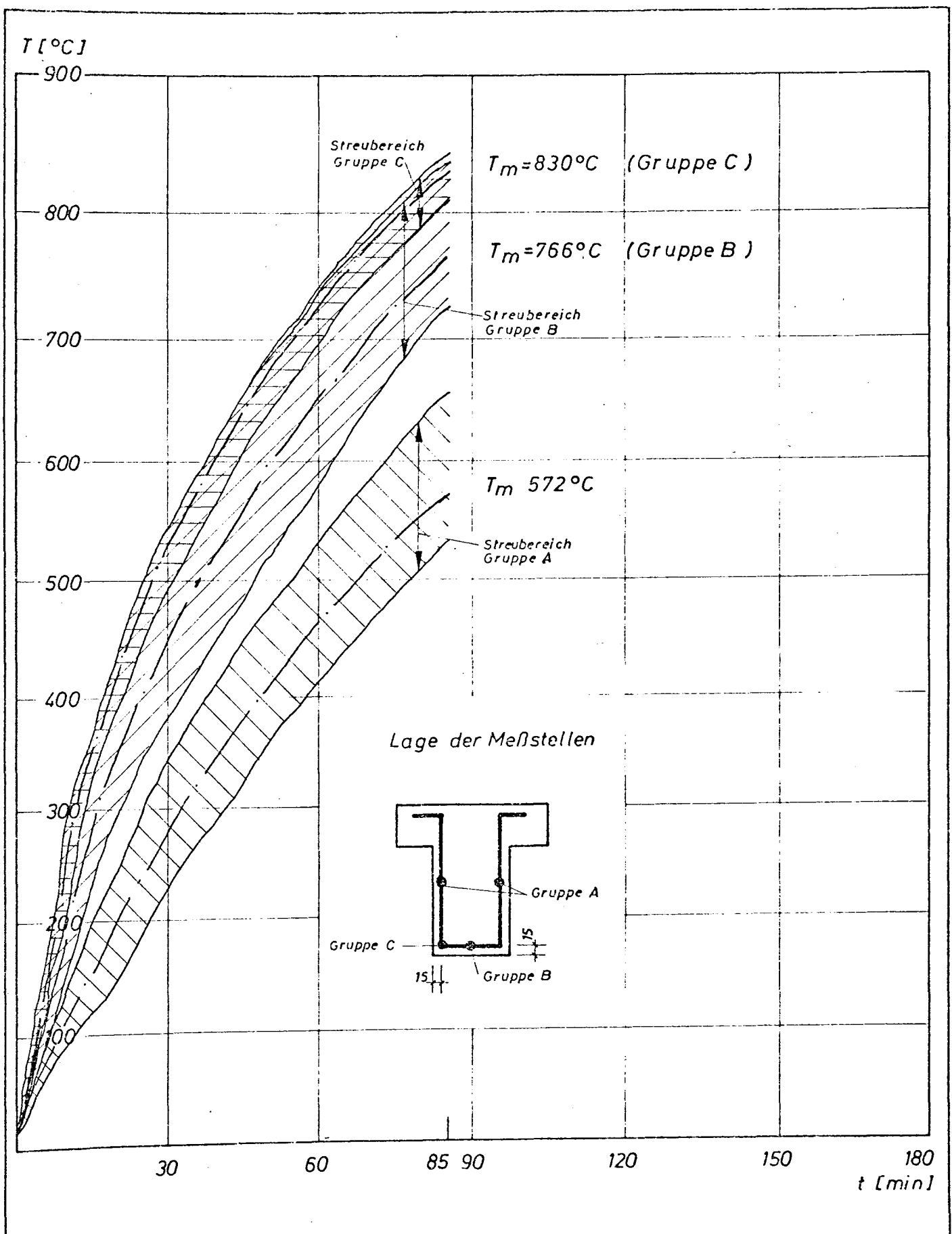
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 7

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.7

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

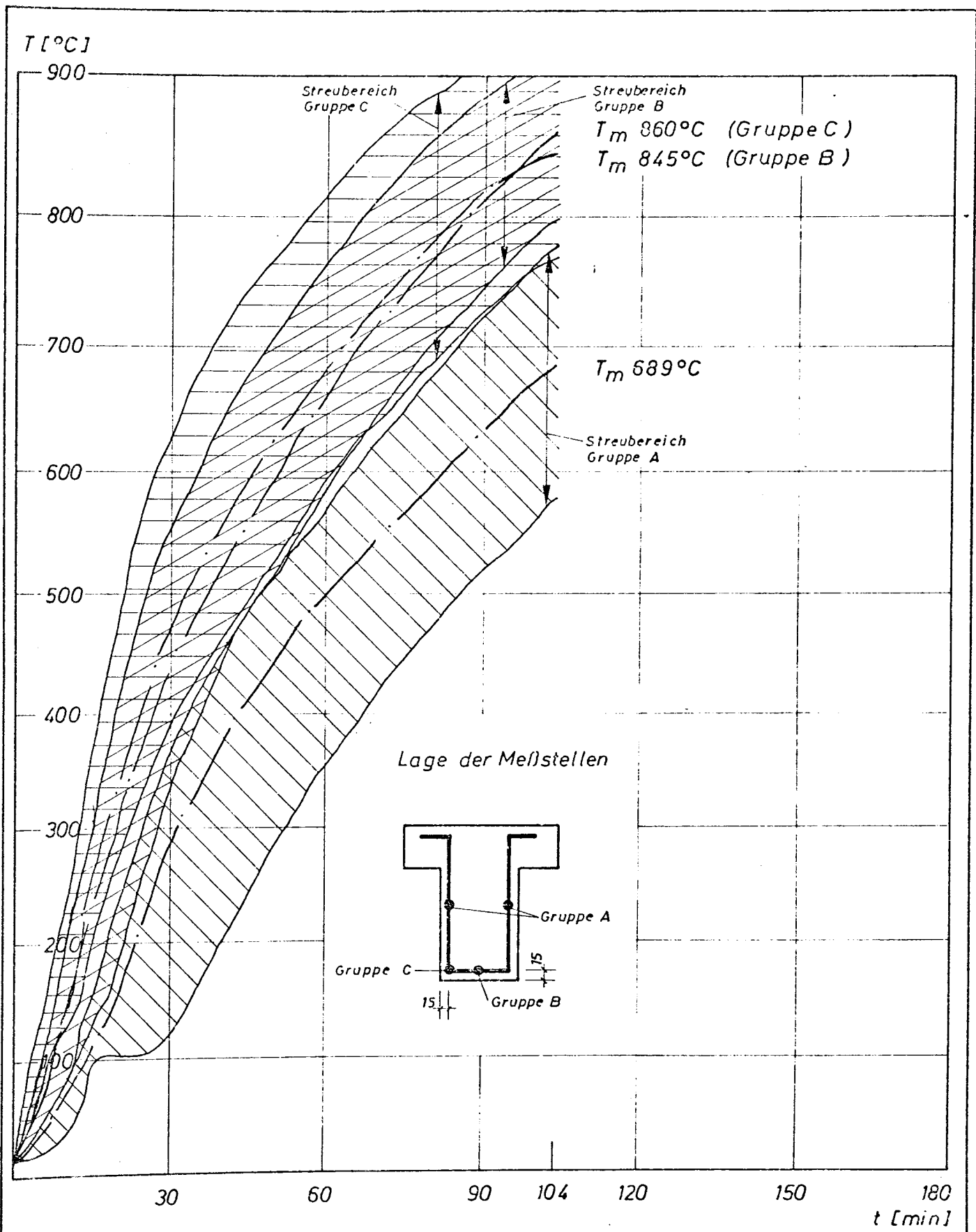
Balken 8

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.8

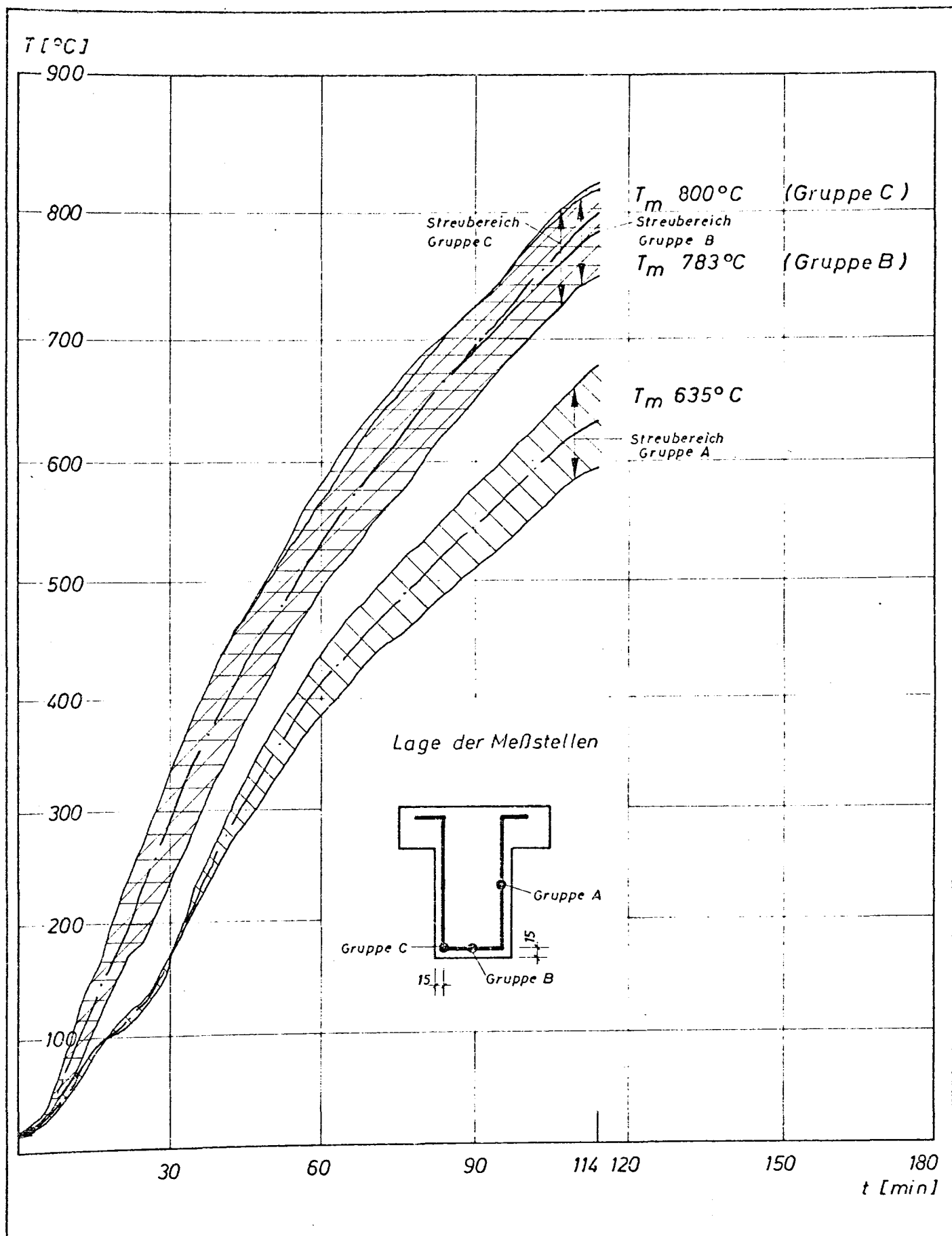
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 9
Temperaturverlauf an den Bügeln	Anlage 5.9
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	





Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

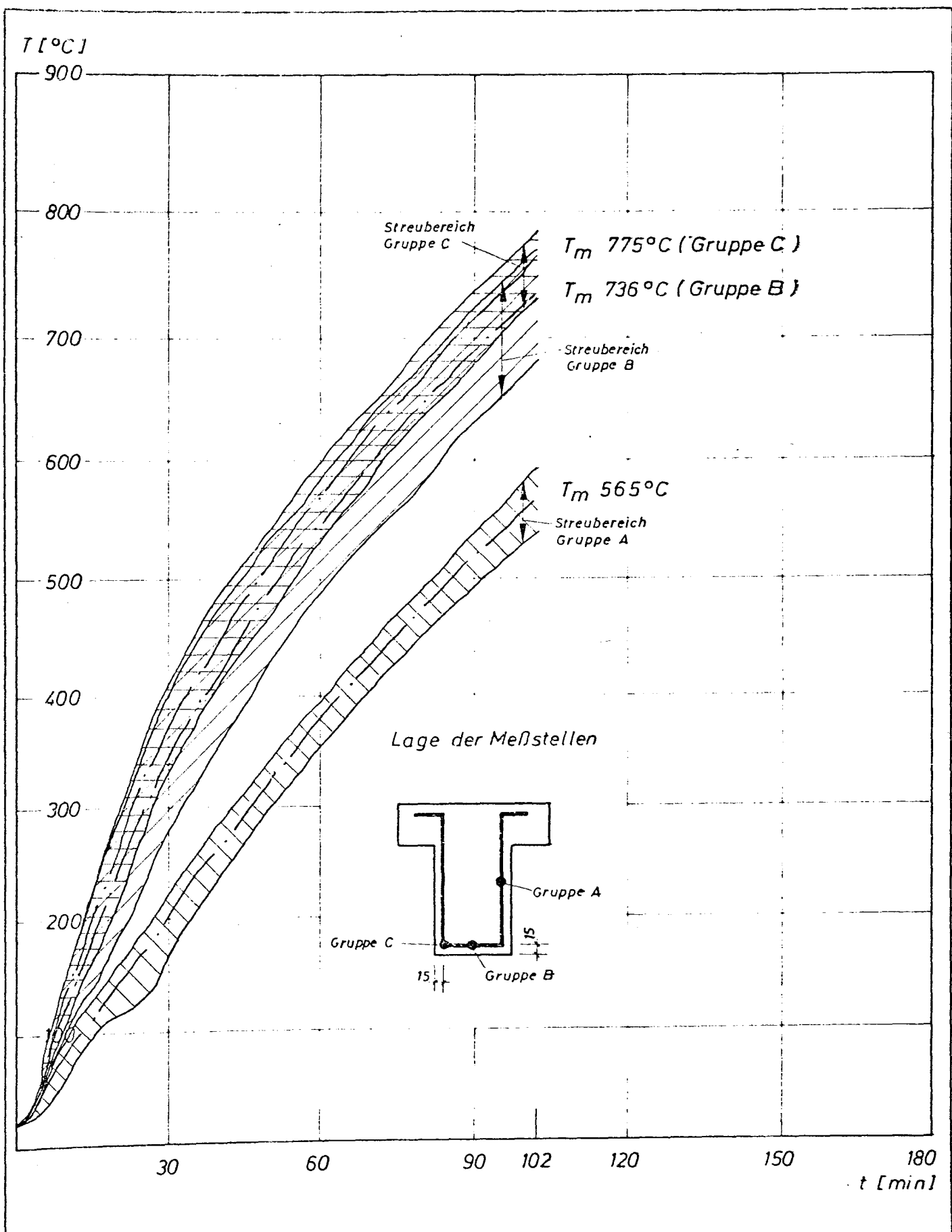
Balken 11

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.11

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

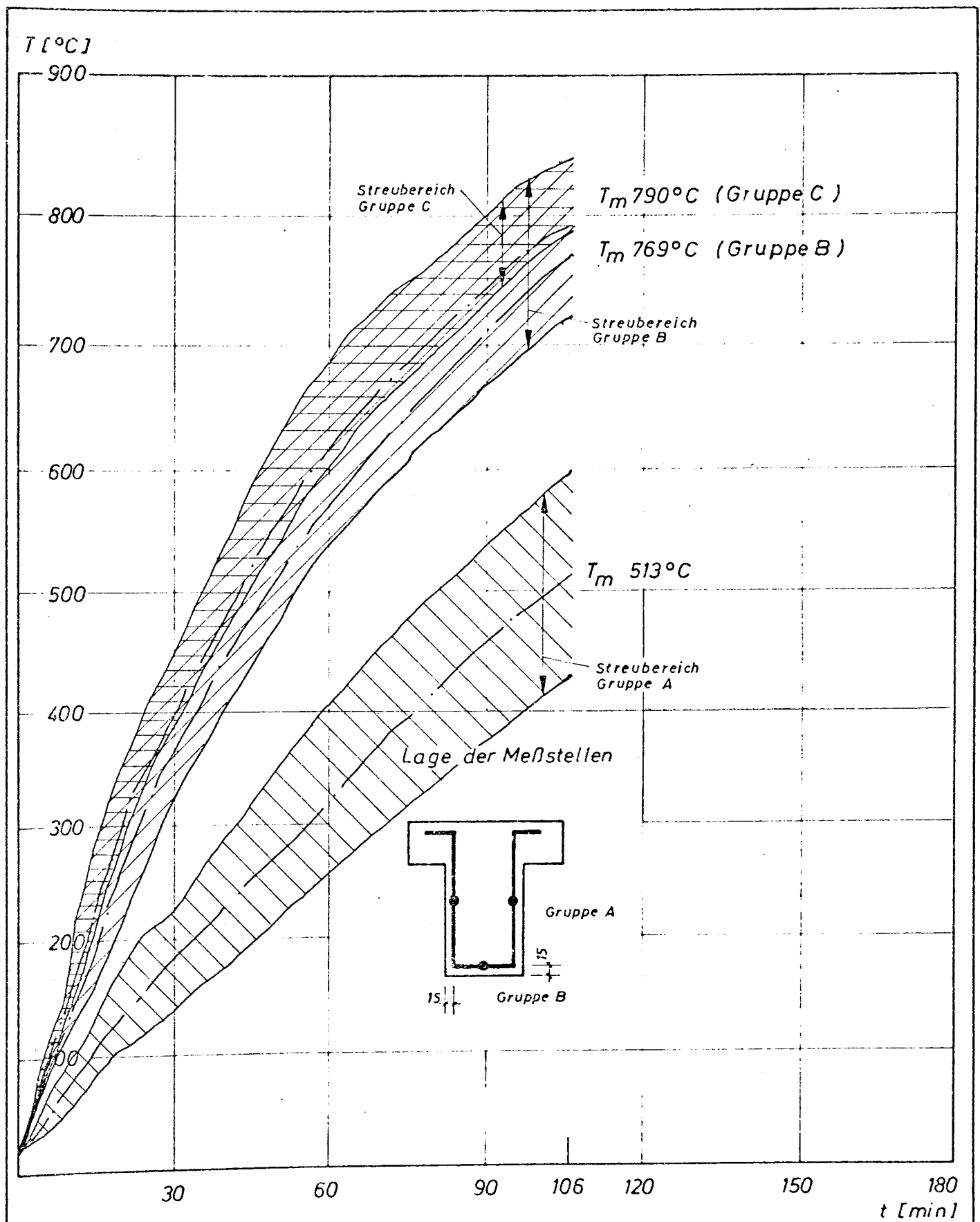
Balken 12

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.12

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

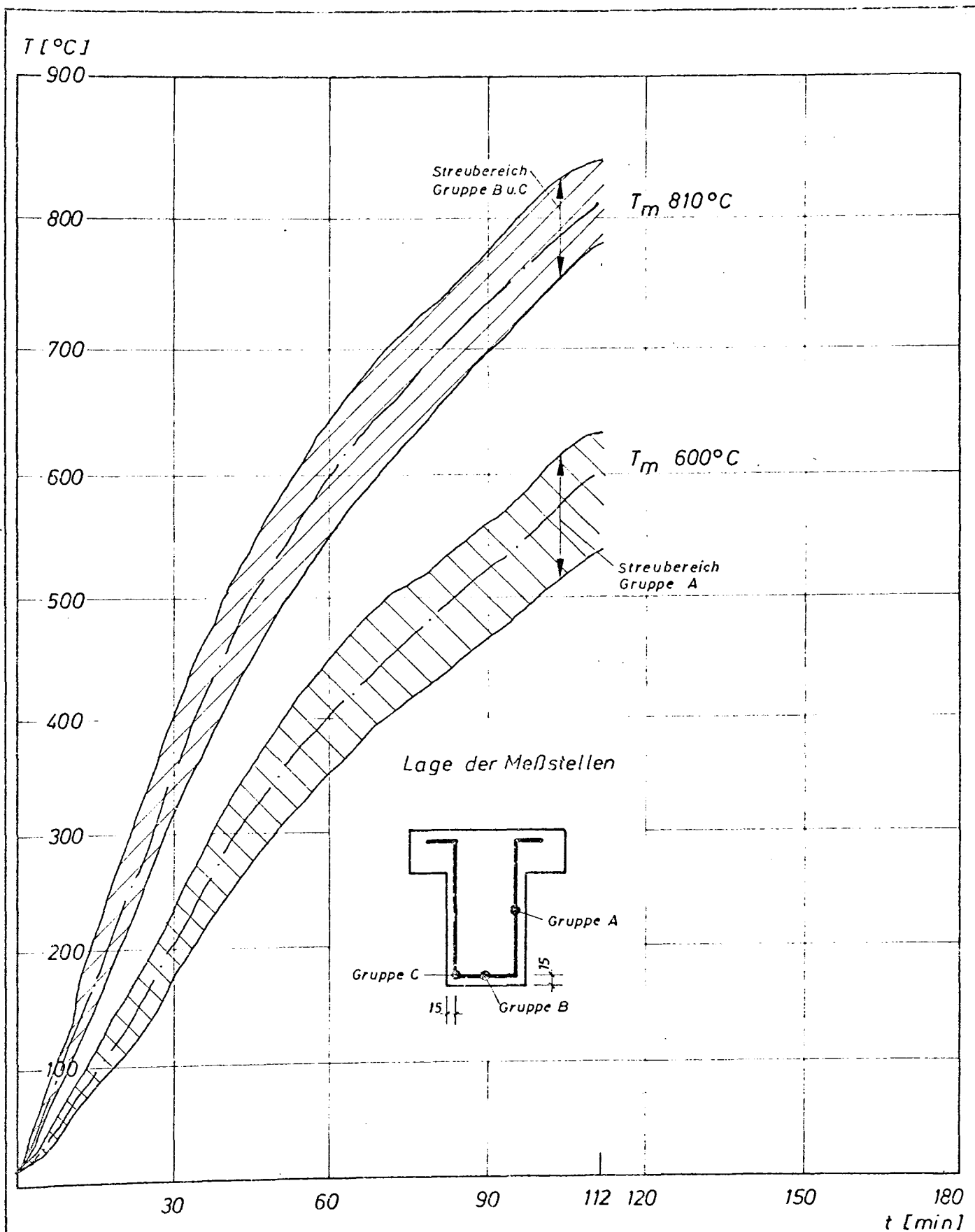
Balken 13

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.13

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

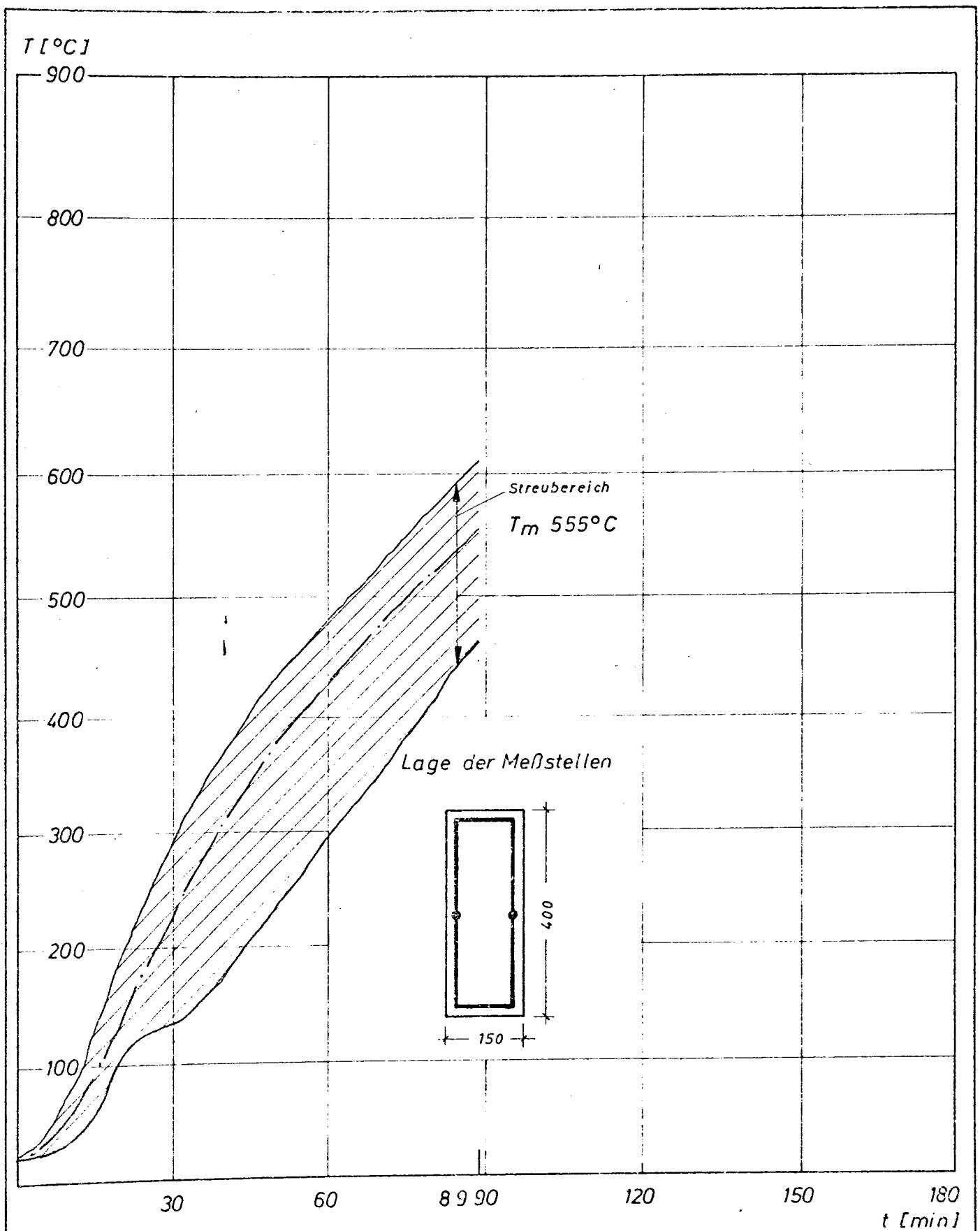
Balken 14

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.14

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



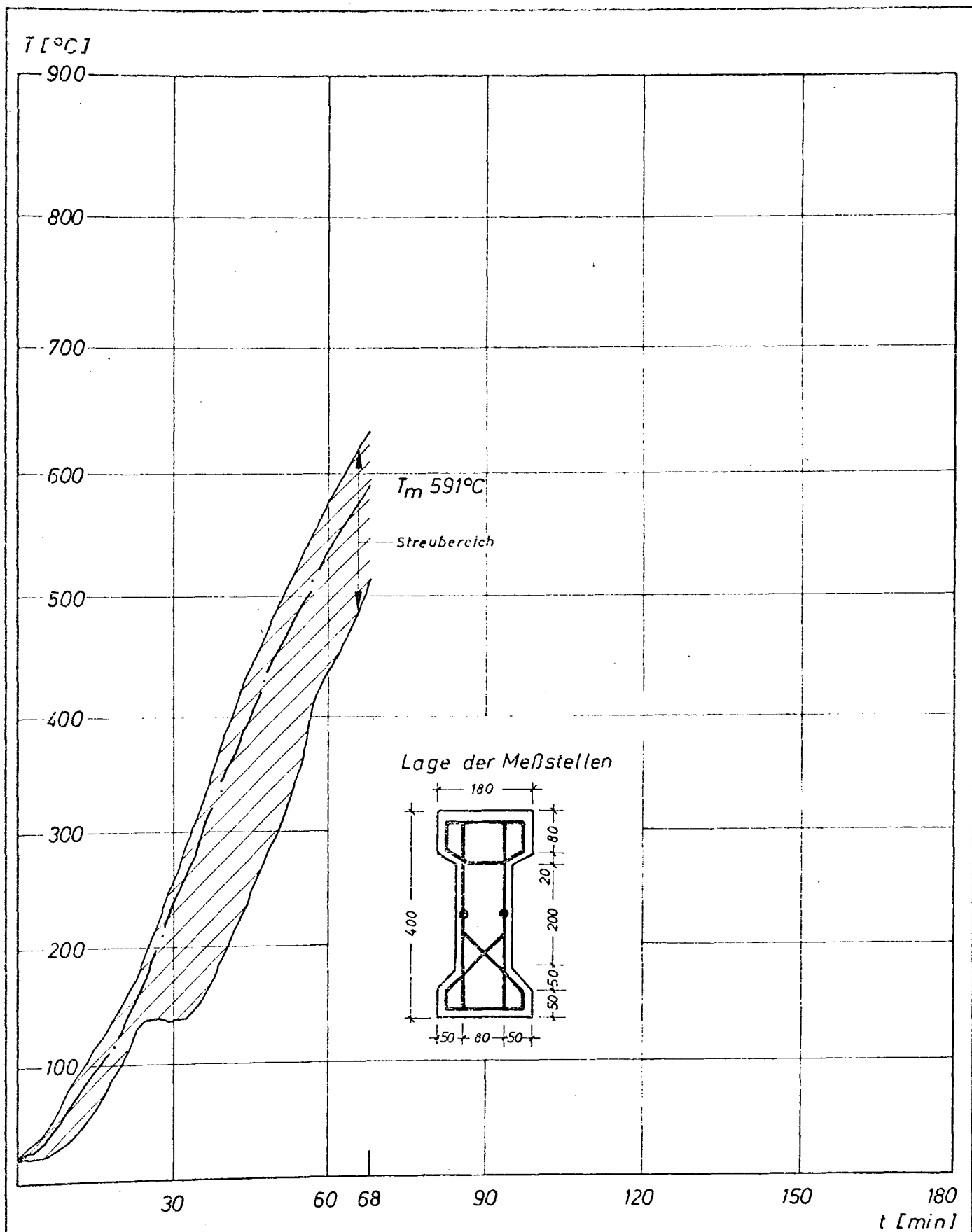
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 16

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.16

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



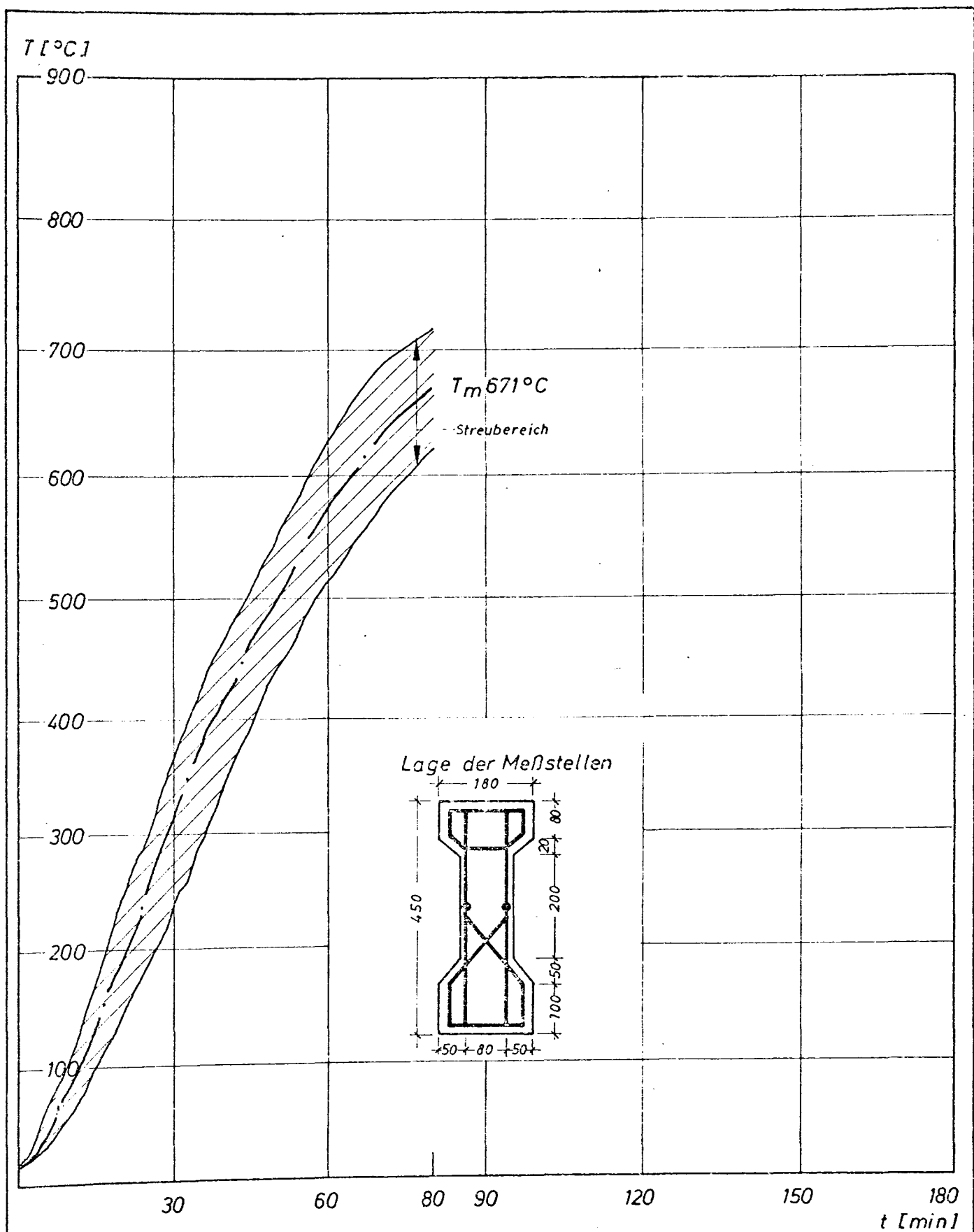
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 17

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.17

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 18

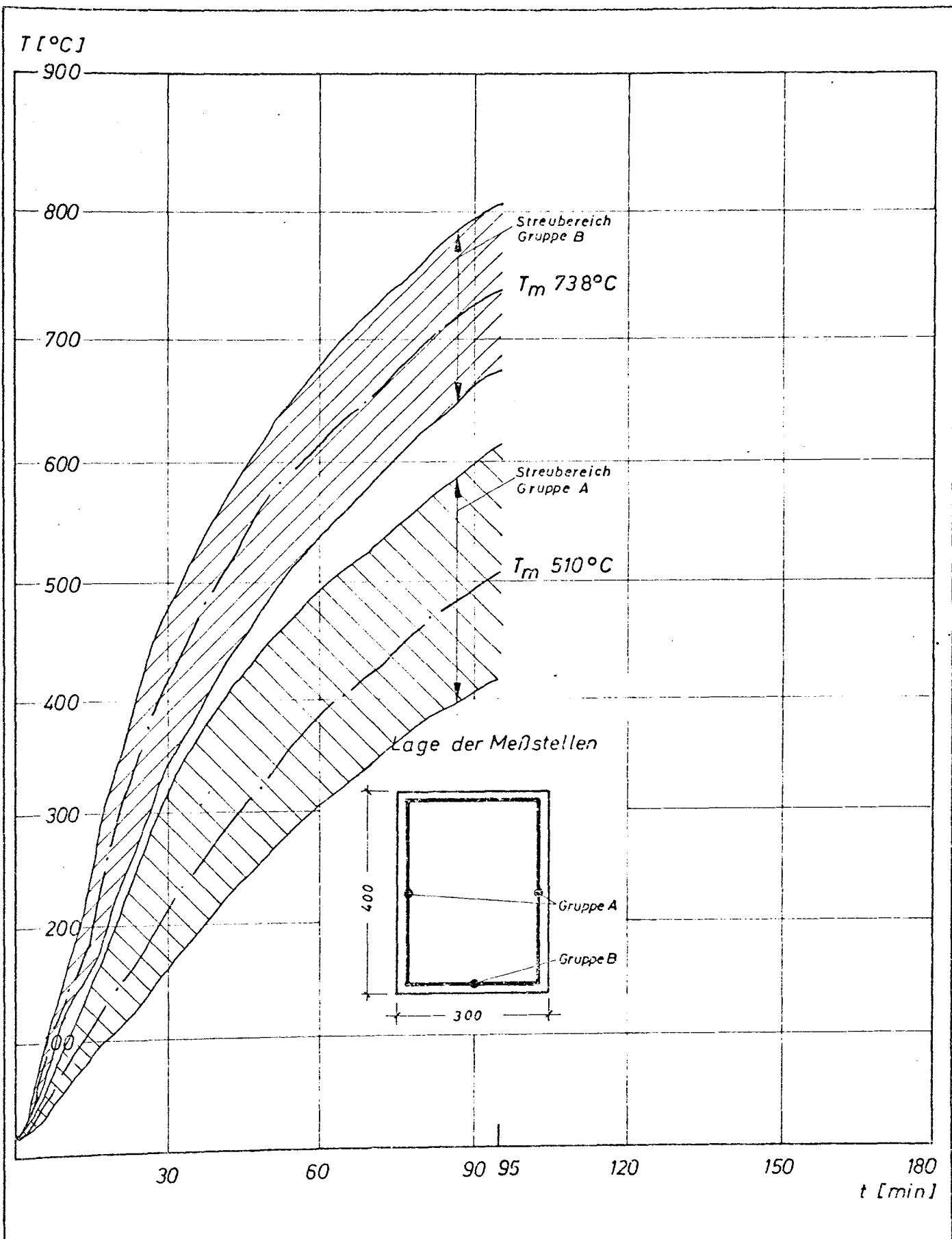
Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.18

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen





Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

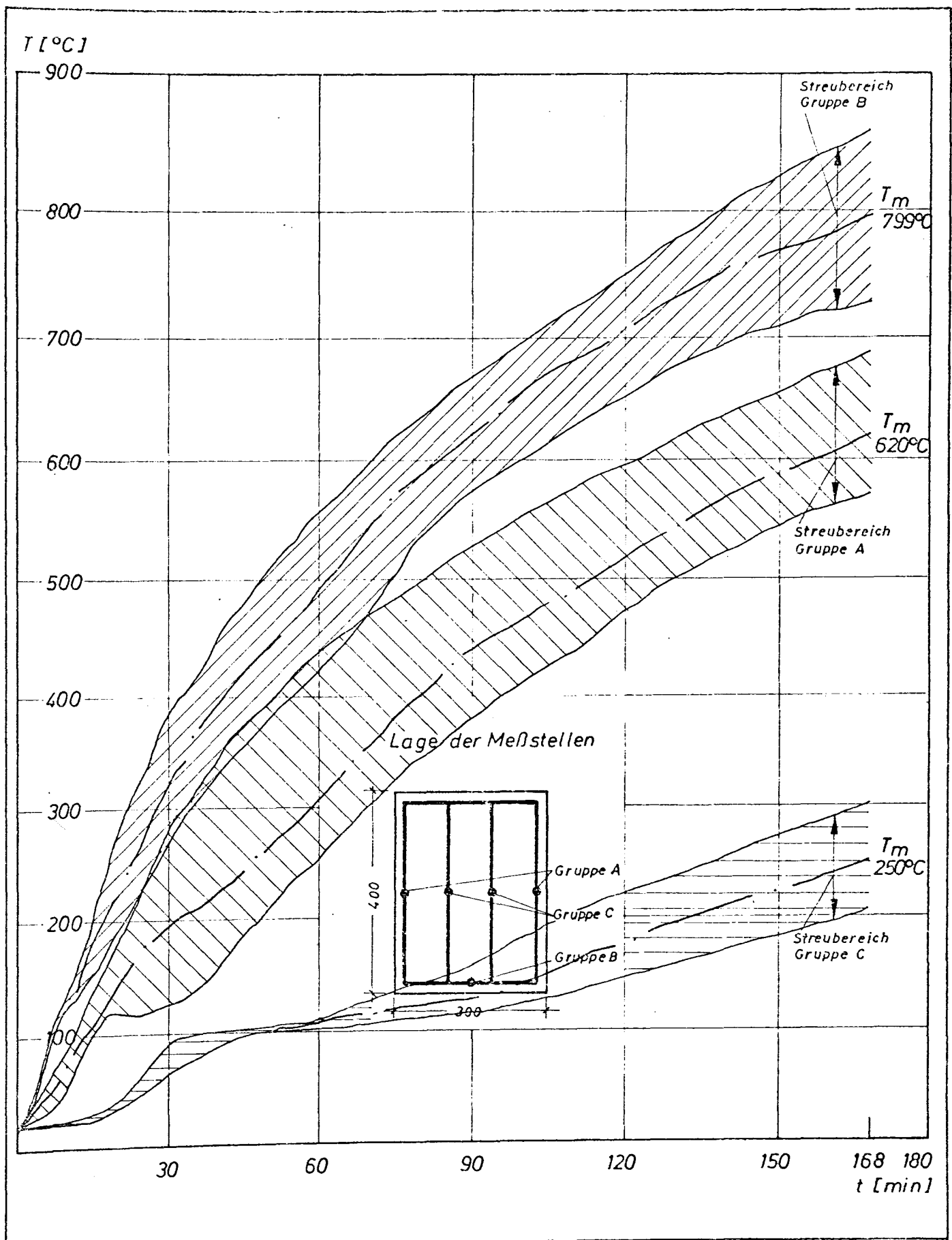
Balken 19

Temperaturverlauf an den Bügeln

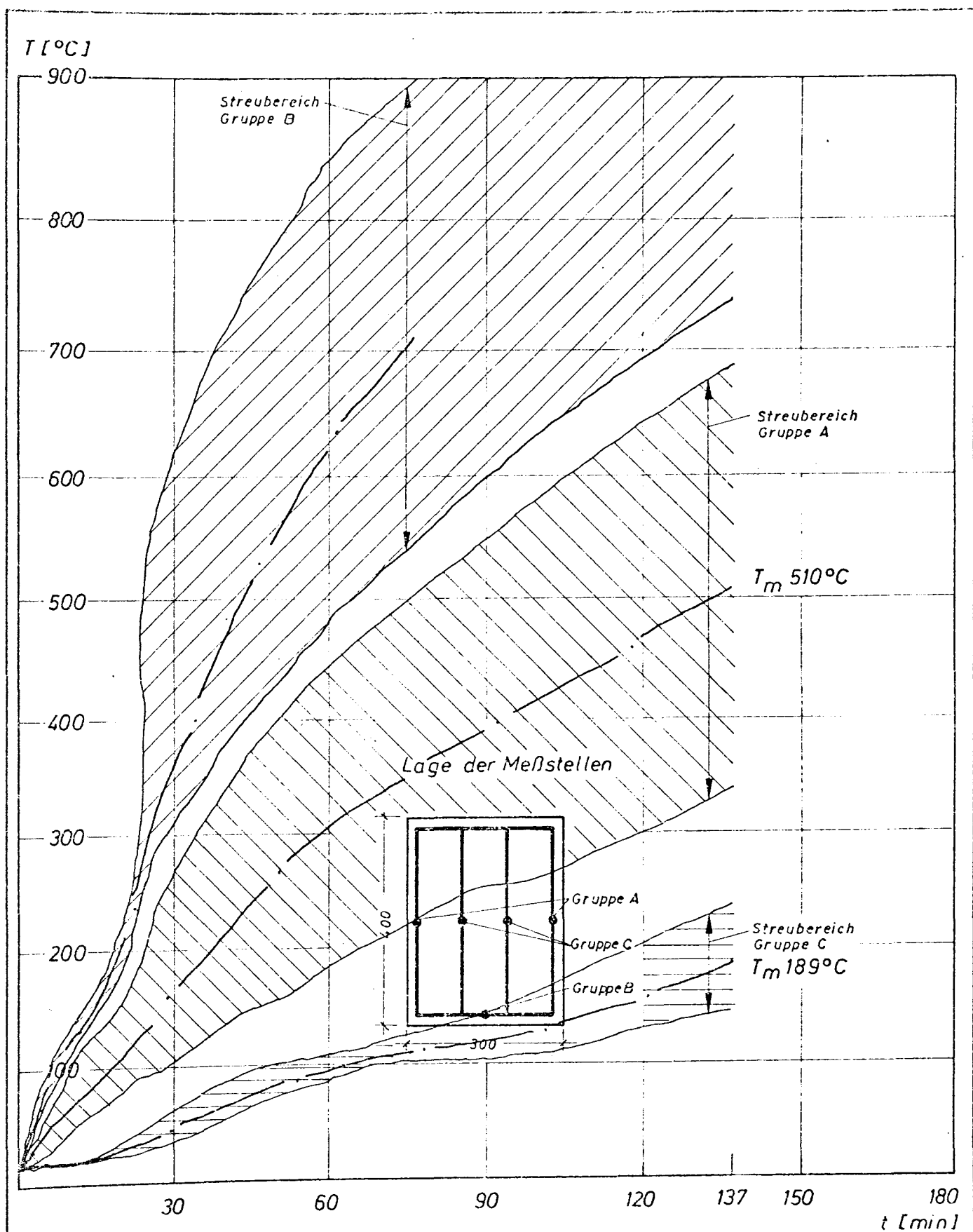
Anlage 5.19

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Ämtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 20
Temperaturverlauf an den Bügeln	Anlage 5. 20
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

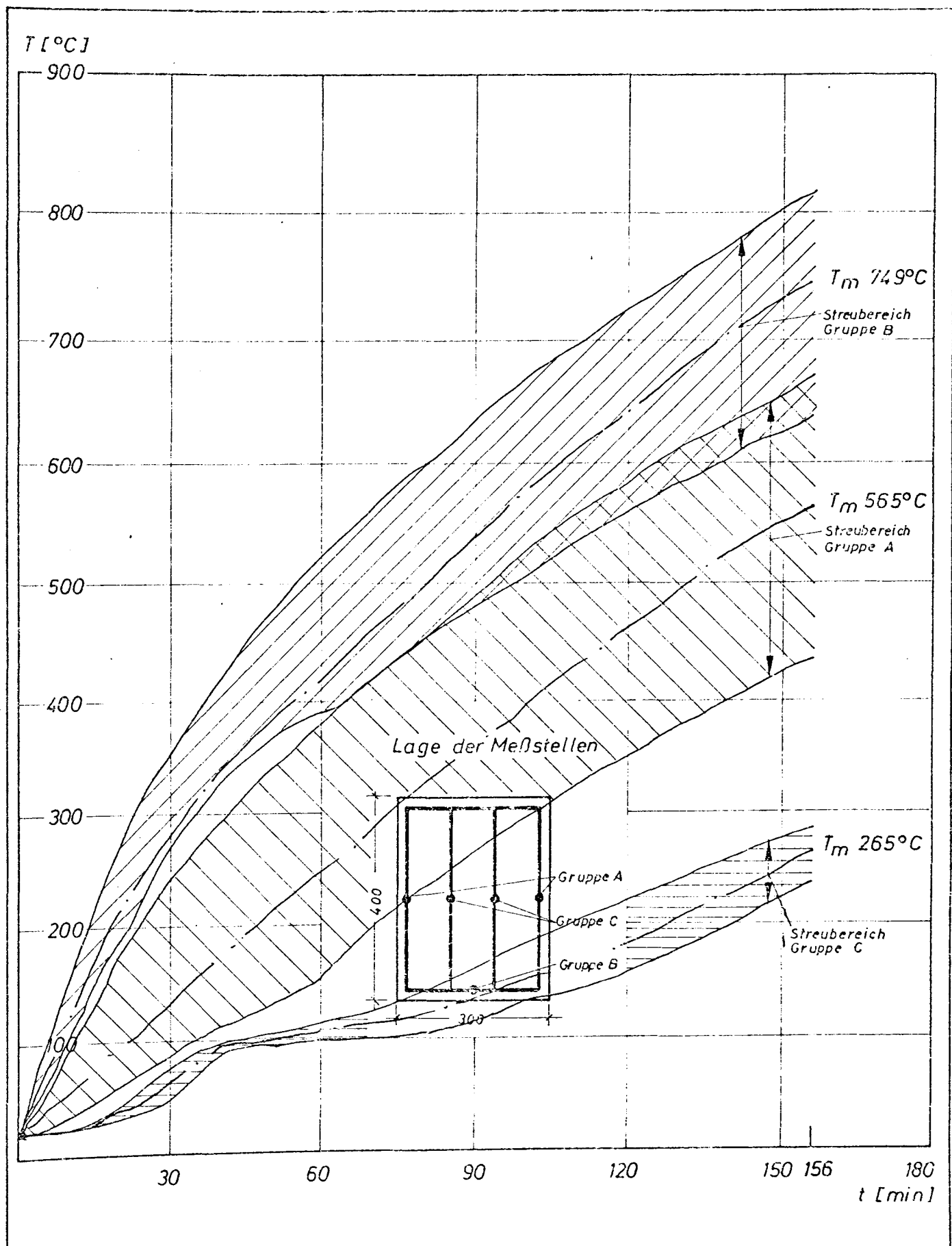
Balken 21

Temperaturverlauf an den Bügeln

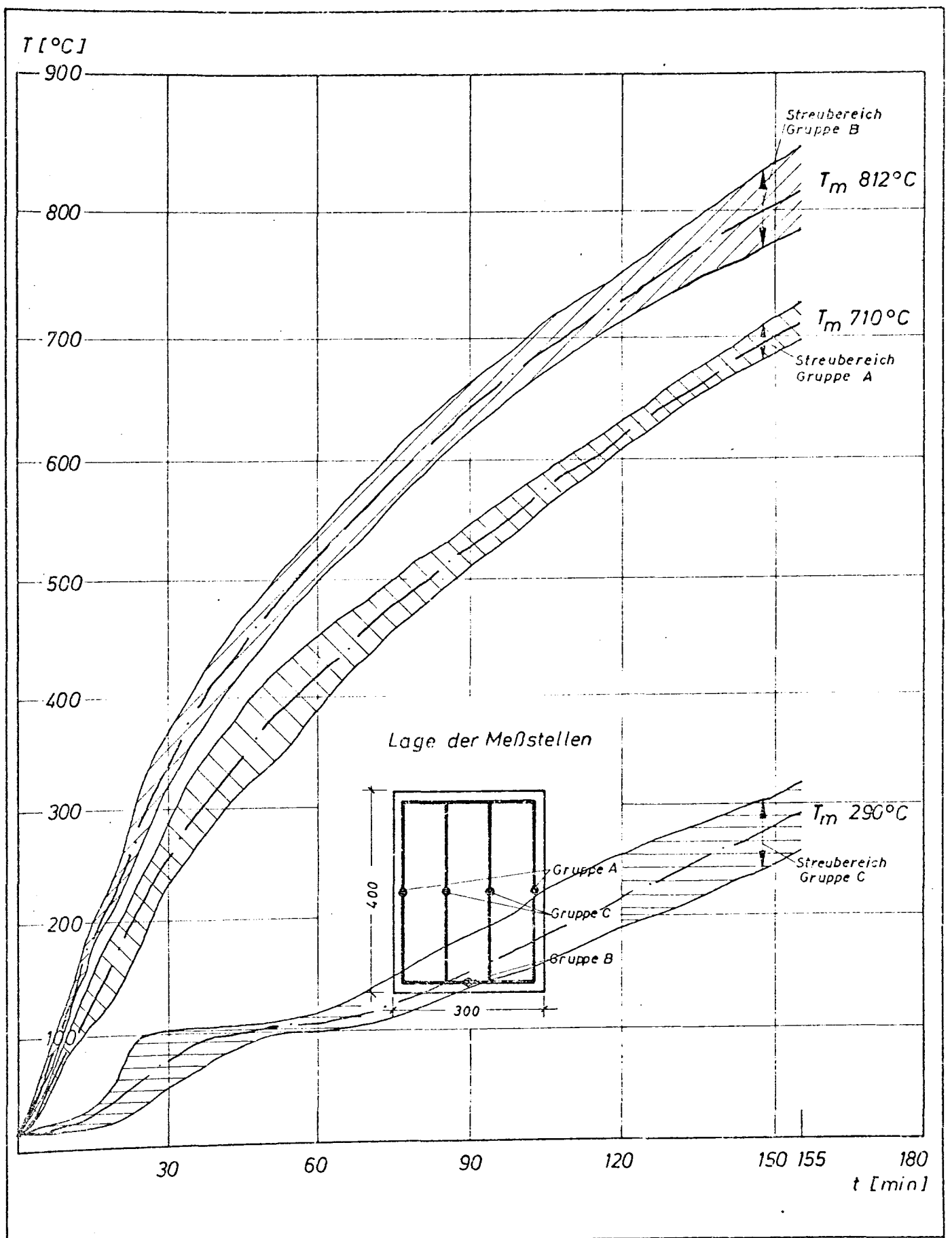
Anlage 5.21

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 22
Temperaturverlauf an den Bügeln	Anlage 5.22
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



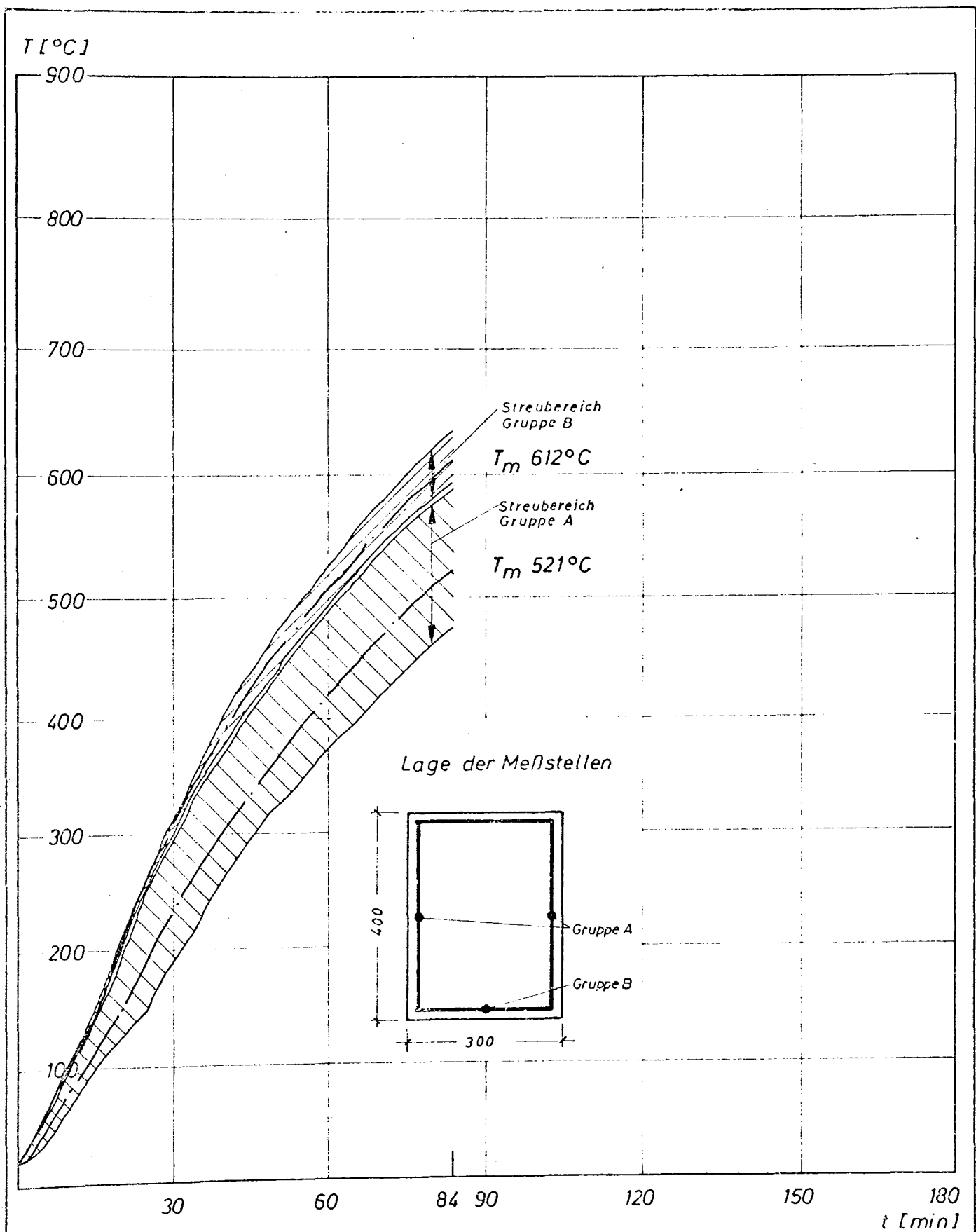
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 23

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.23

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

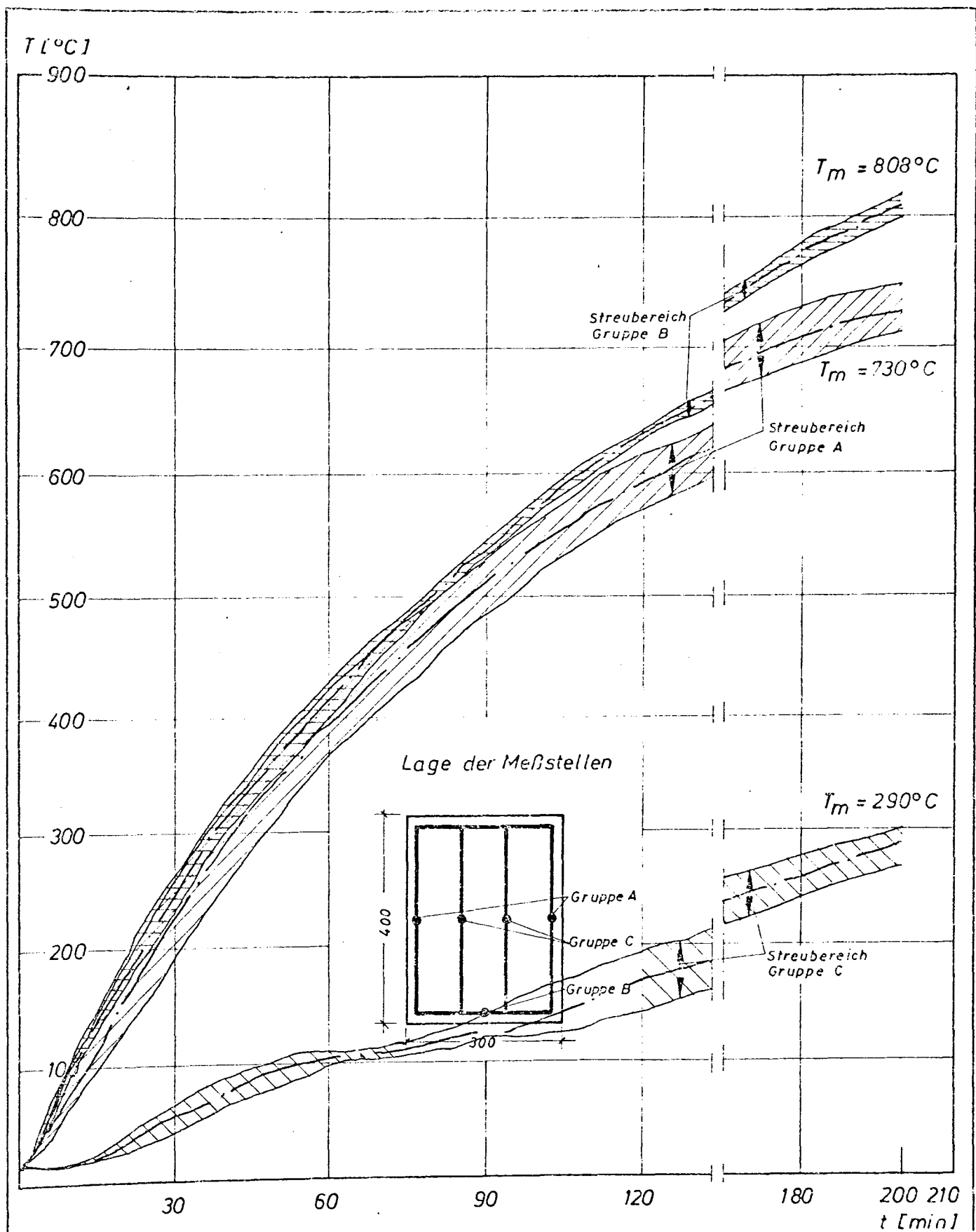
Balken 24

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.24

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

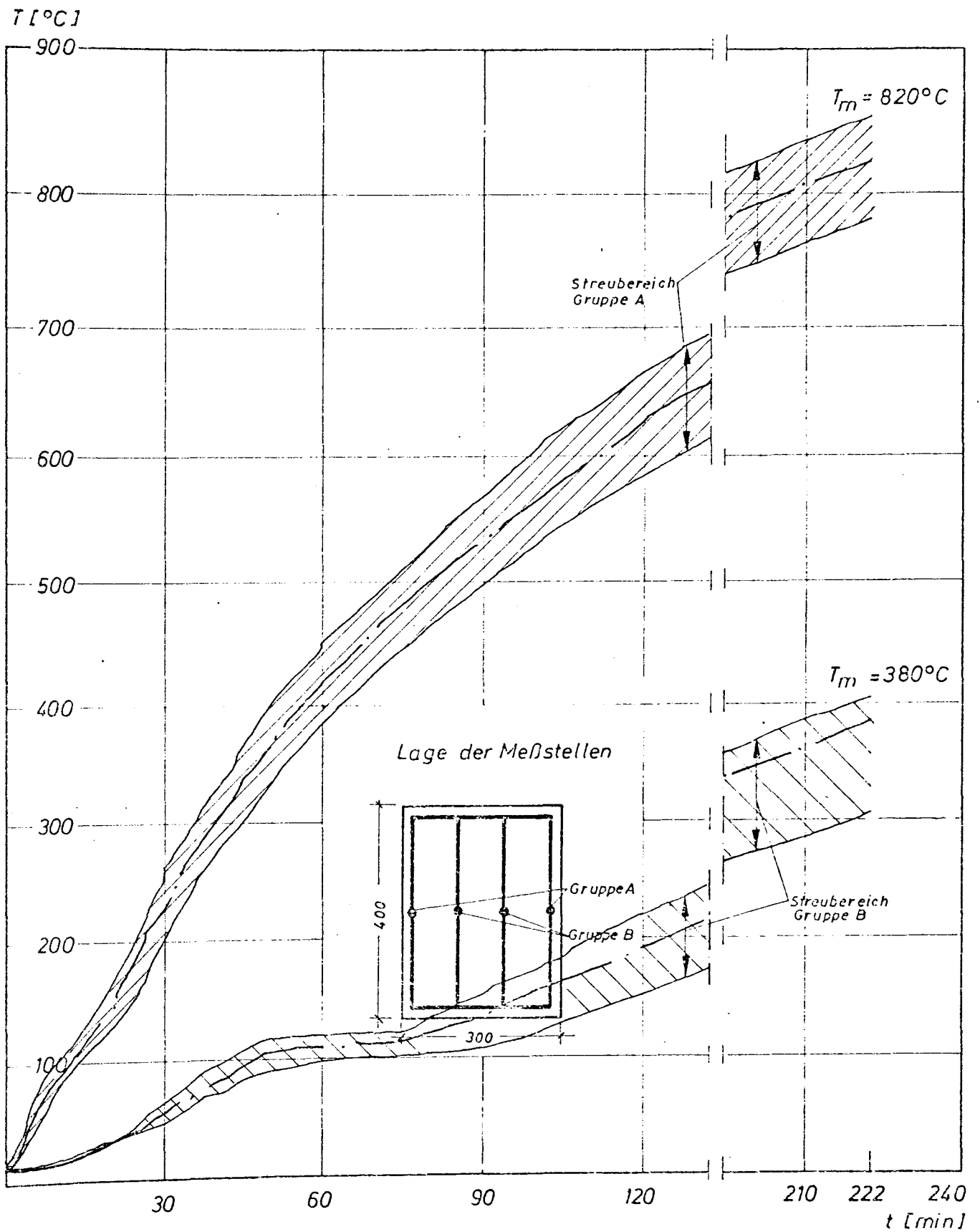
Balken 25

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.25

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen





Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

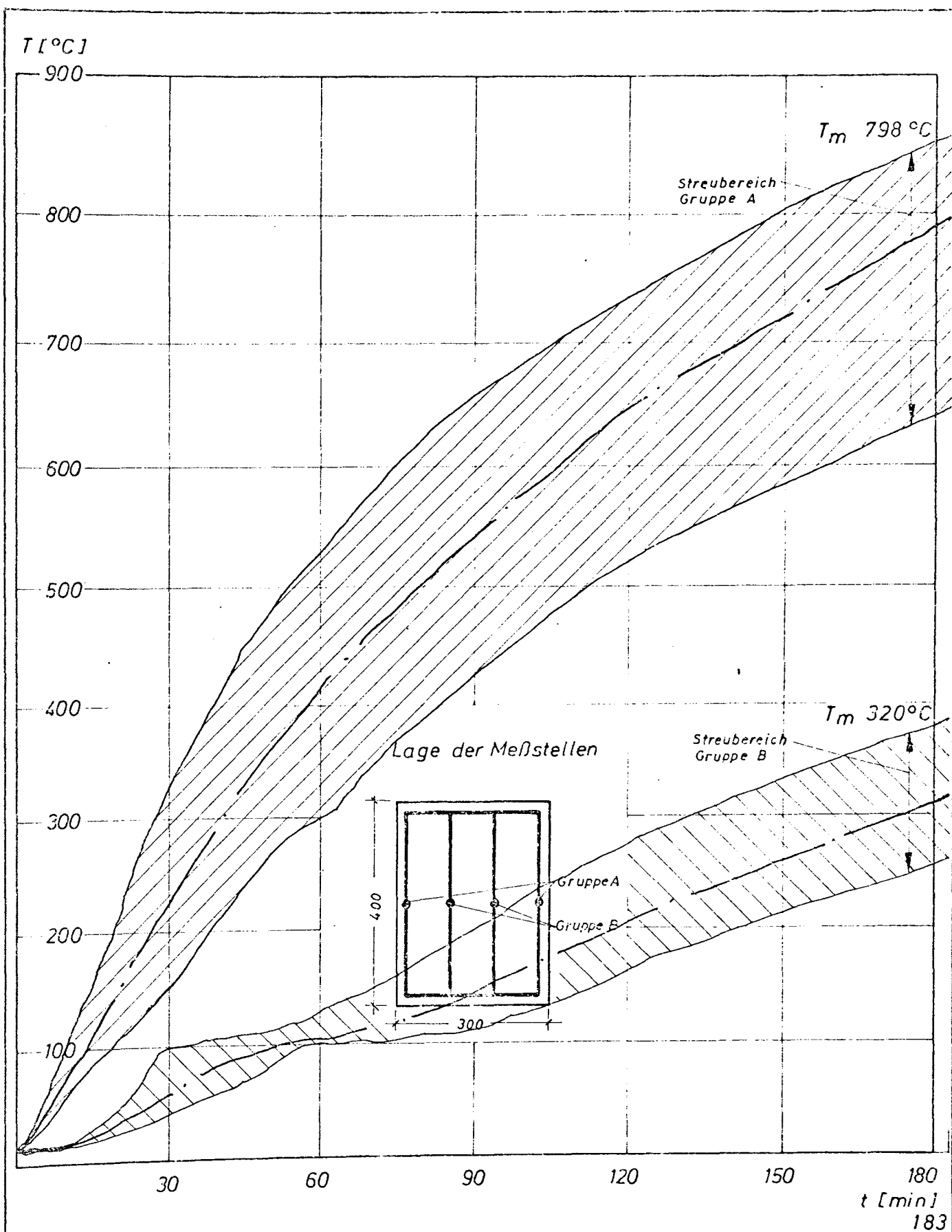
Balken 26

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.26

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

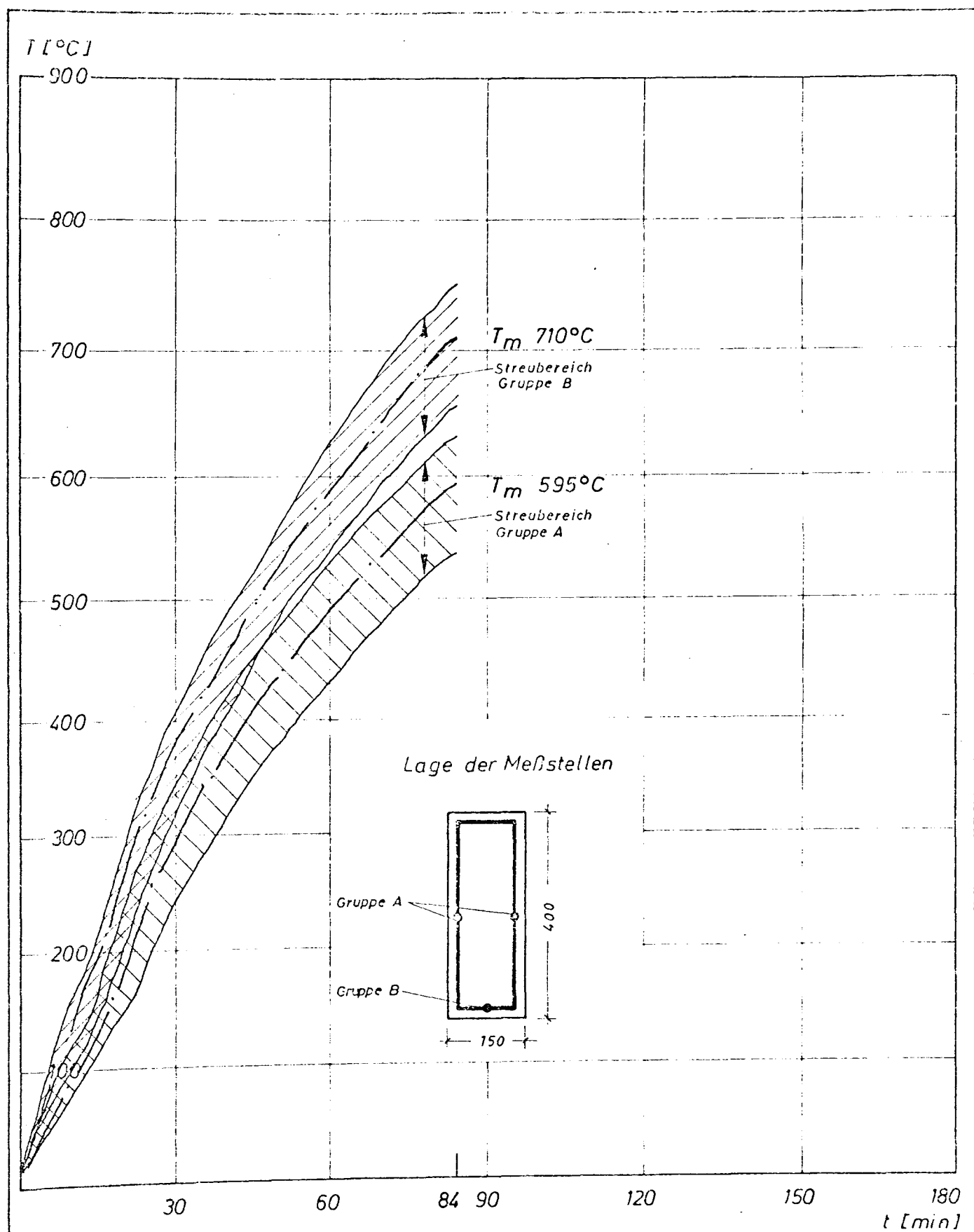
Balken 27

Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.27

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 28

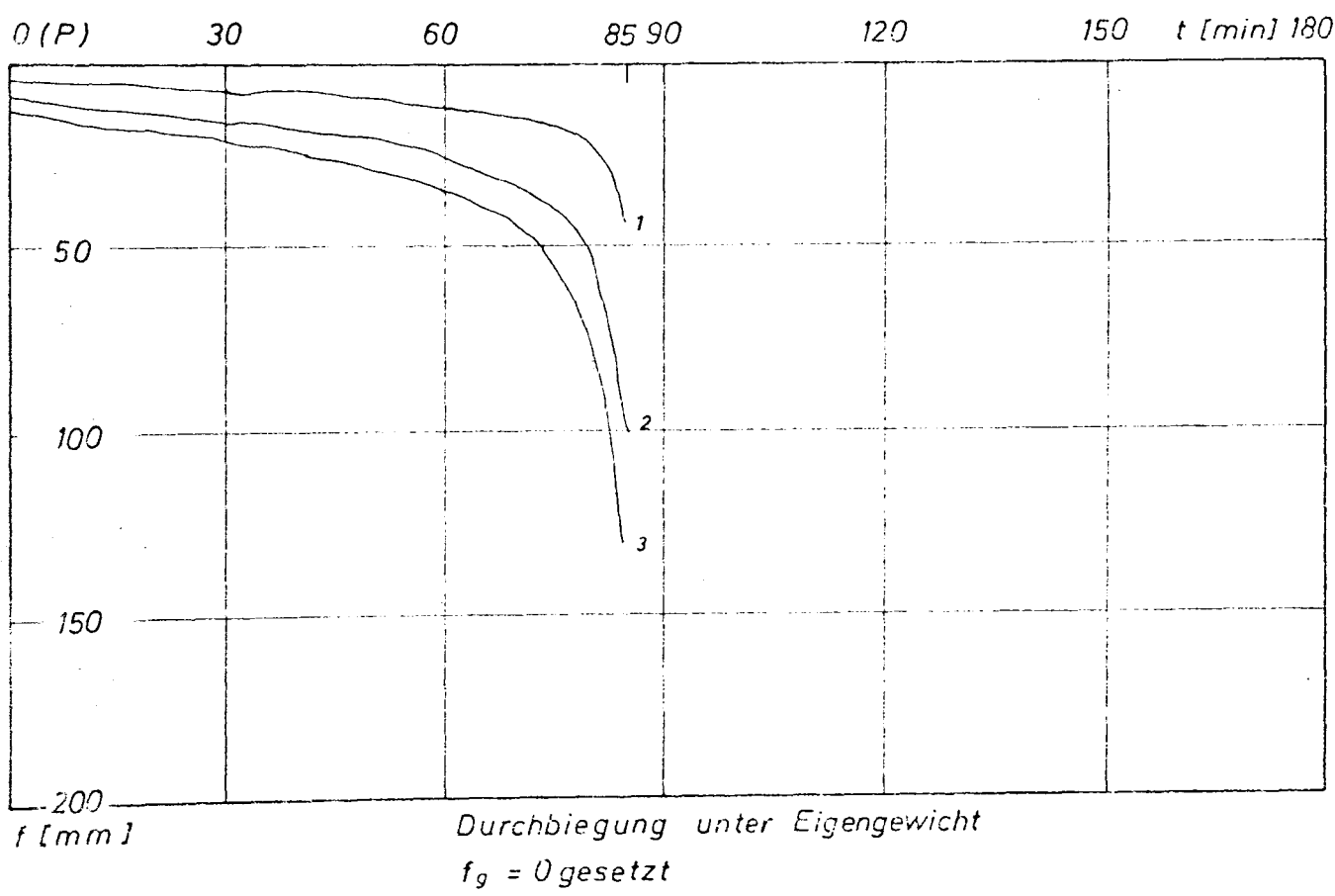
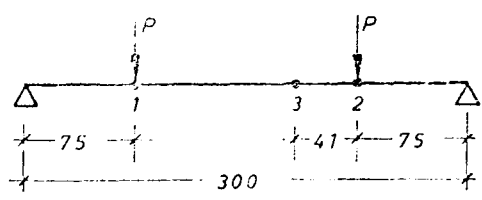
Temperaturverlauf an den Bügeln

Anlage 5.28

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

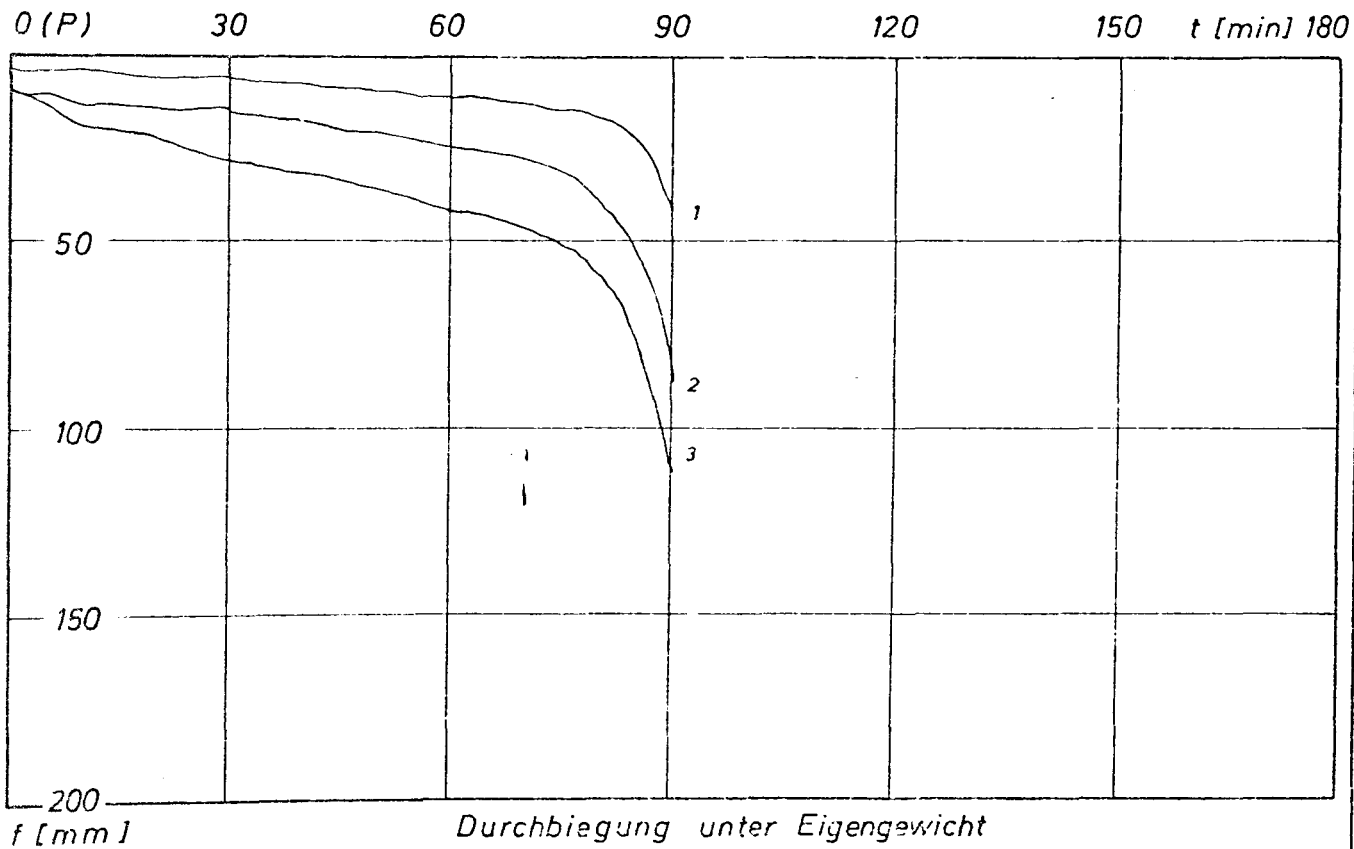
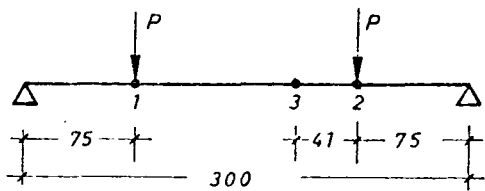
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 1
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.1
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

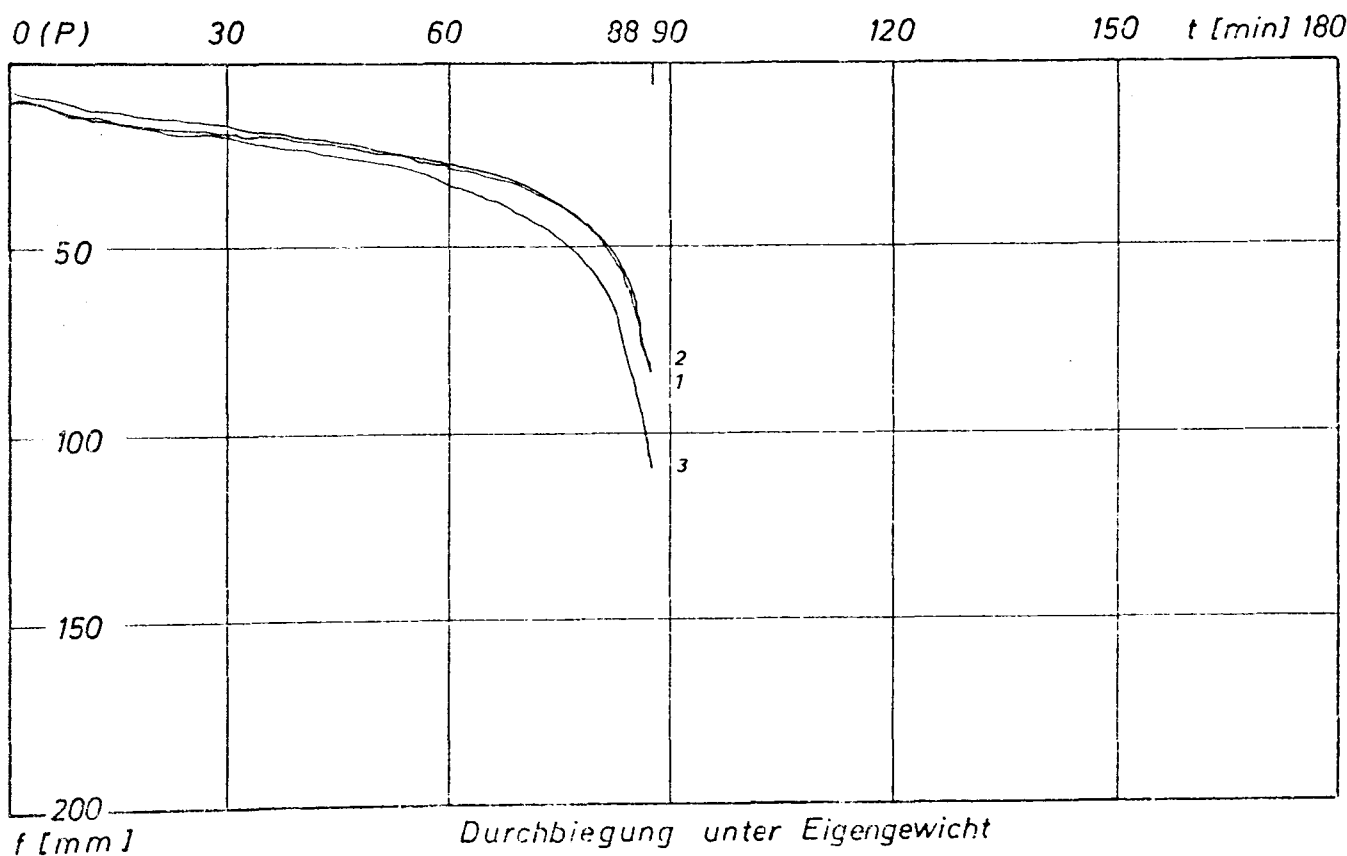
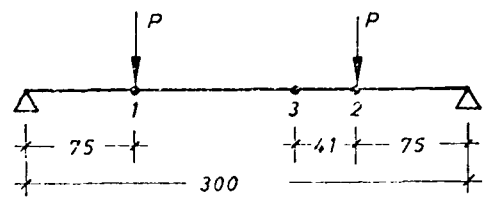
Lage der Meßstellen



Durchbiegung unter Eigengewicht  
 $f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 2
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.2
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

Lage der Meßstellen



Durchbiegung unter Eigengewicht  
 $f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

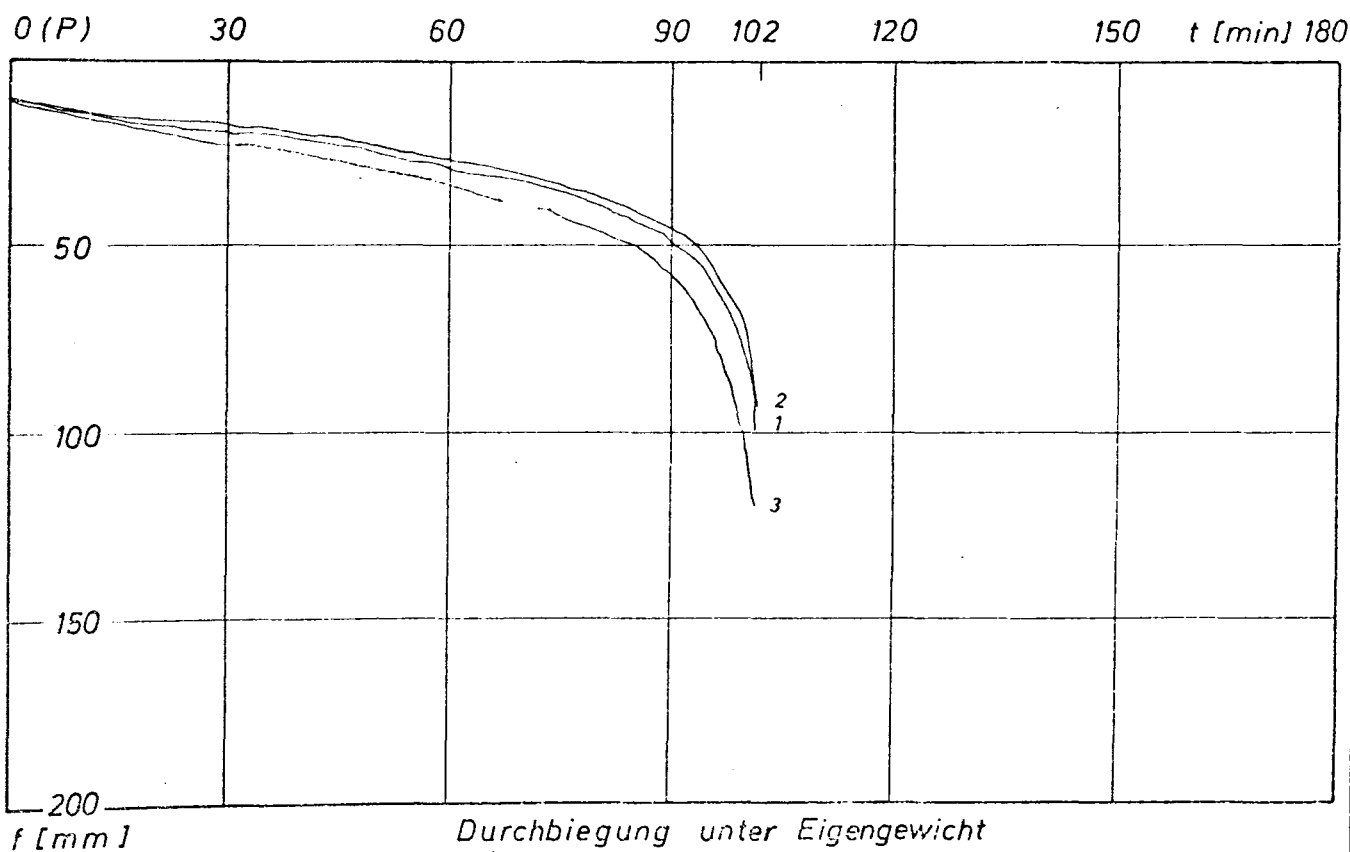
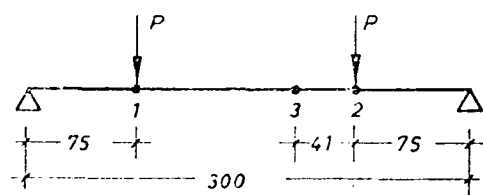
Balken 3

Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.3

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Lage der Meßstellen



Durchbiegung unter Eigengewicht  
 $f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

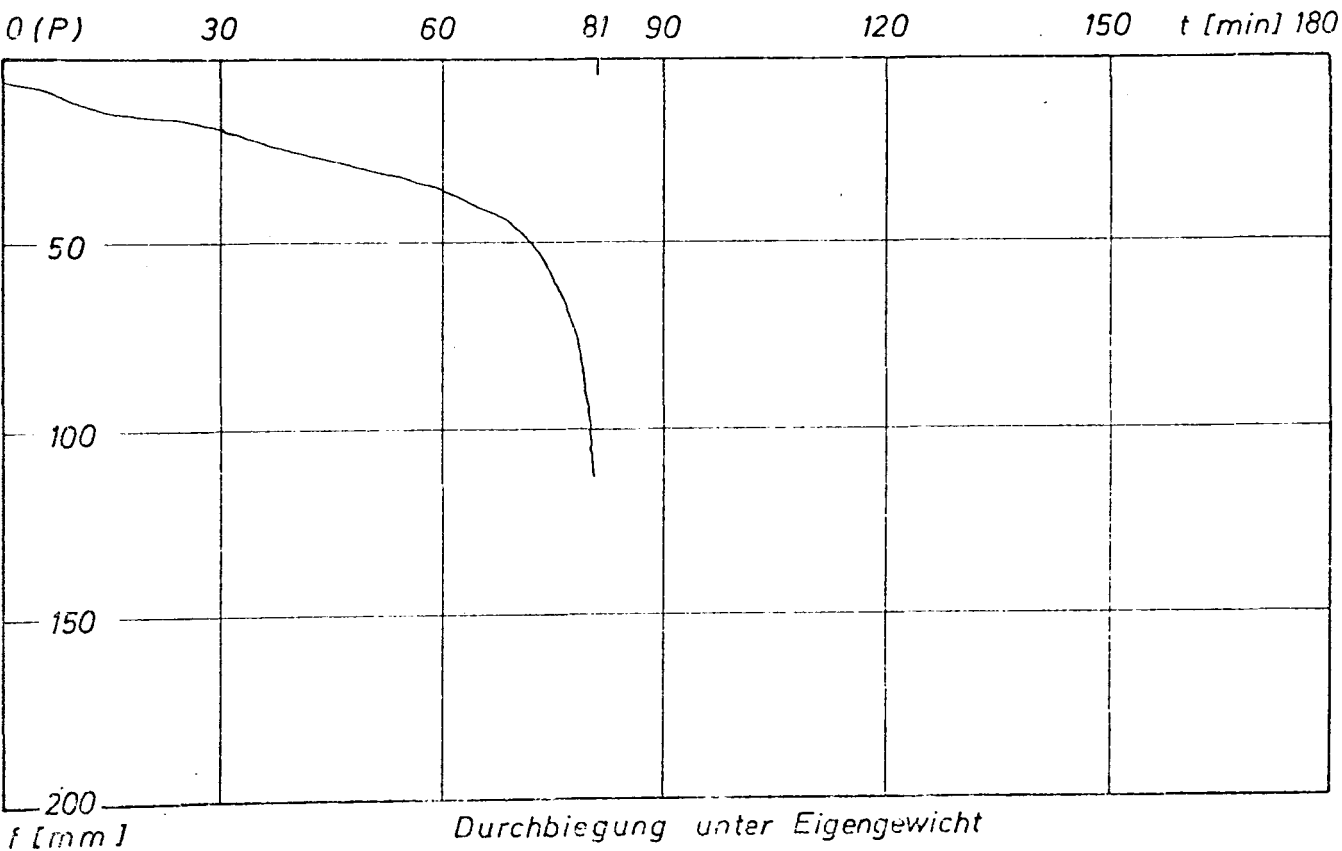
Balken 4

Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.4

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

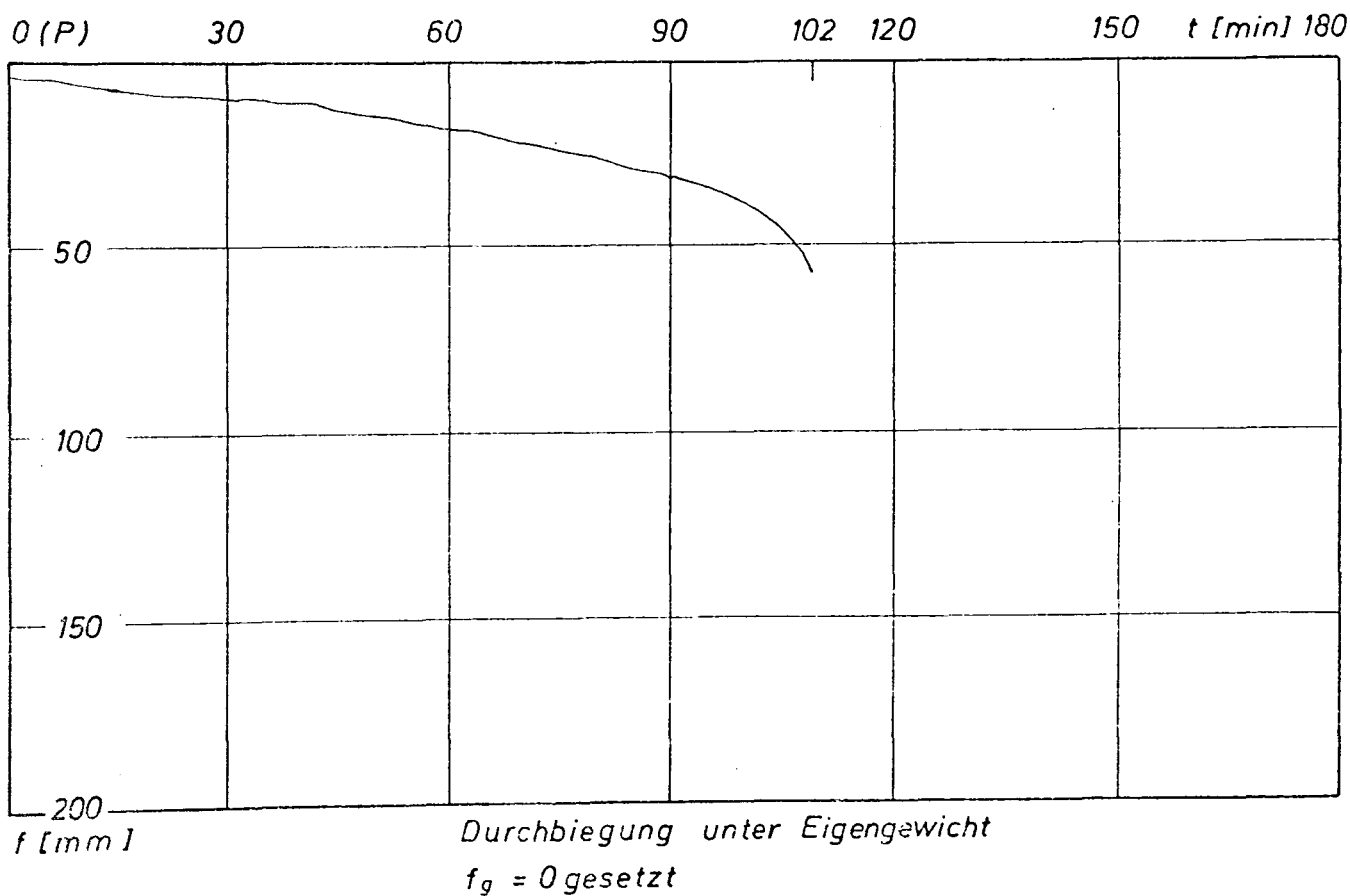
Messung in Feldmitte



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 5
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.5
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

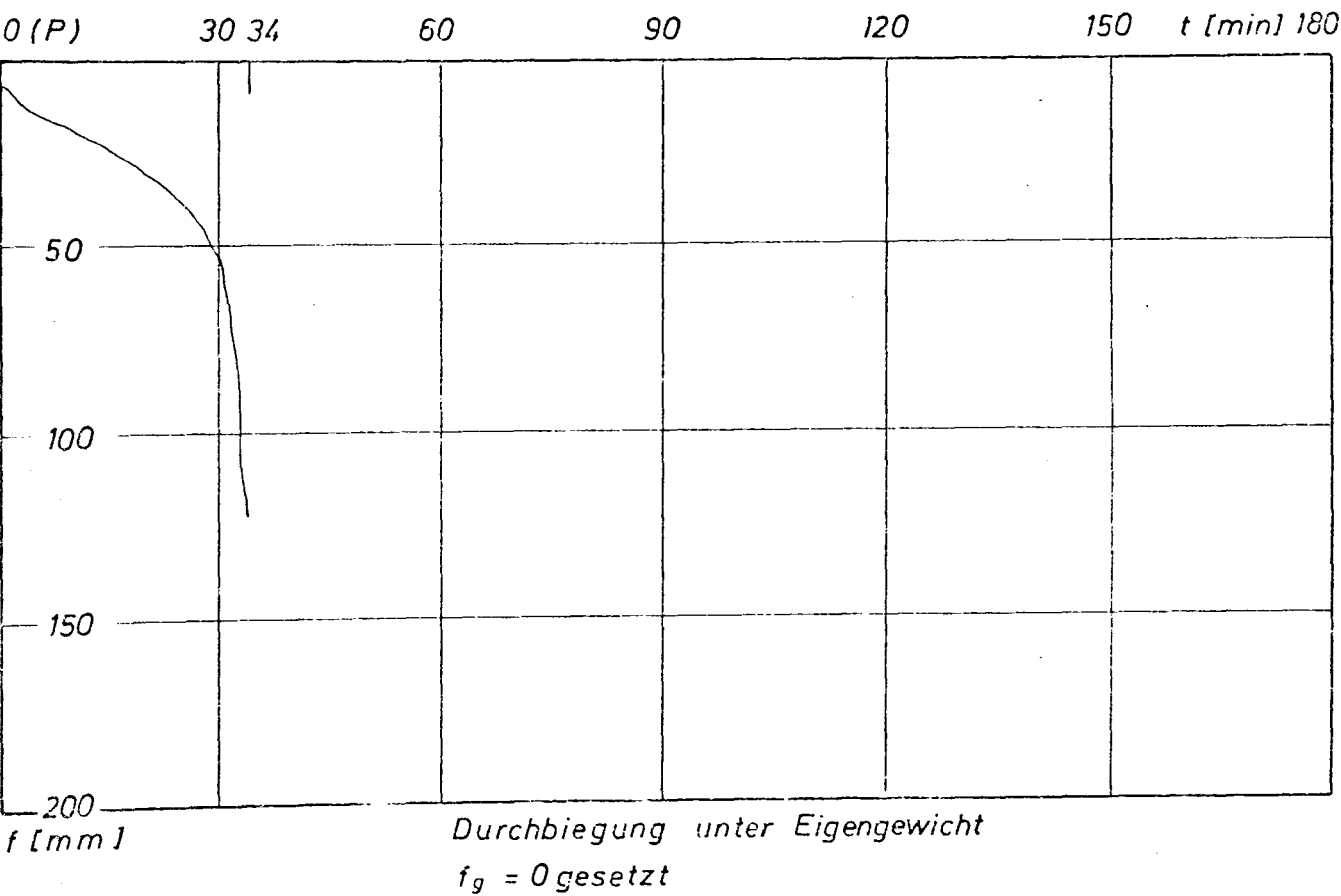


Messung in Feldmitte



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 6
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.6
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

Messung in Feldmitte



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

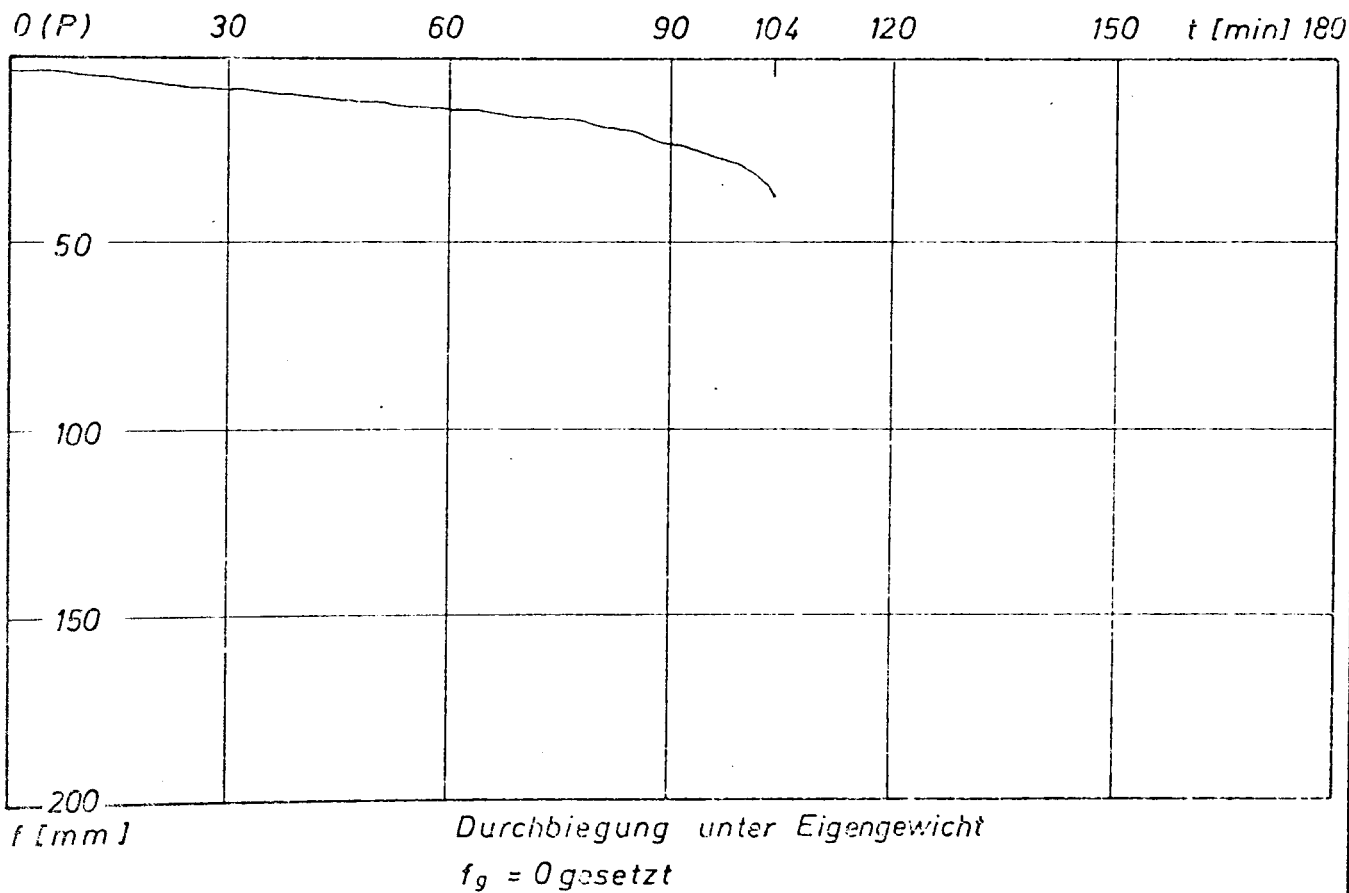
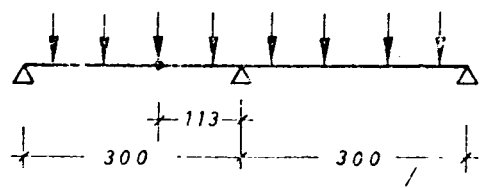
Balken 7

Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.7

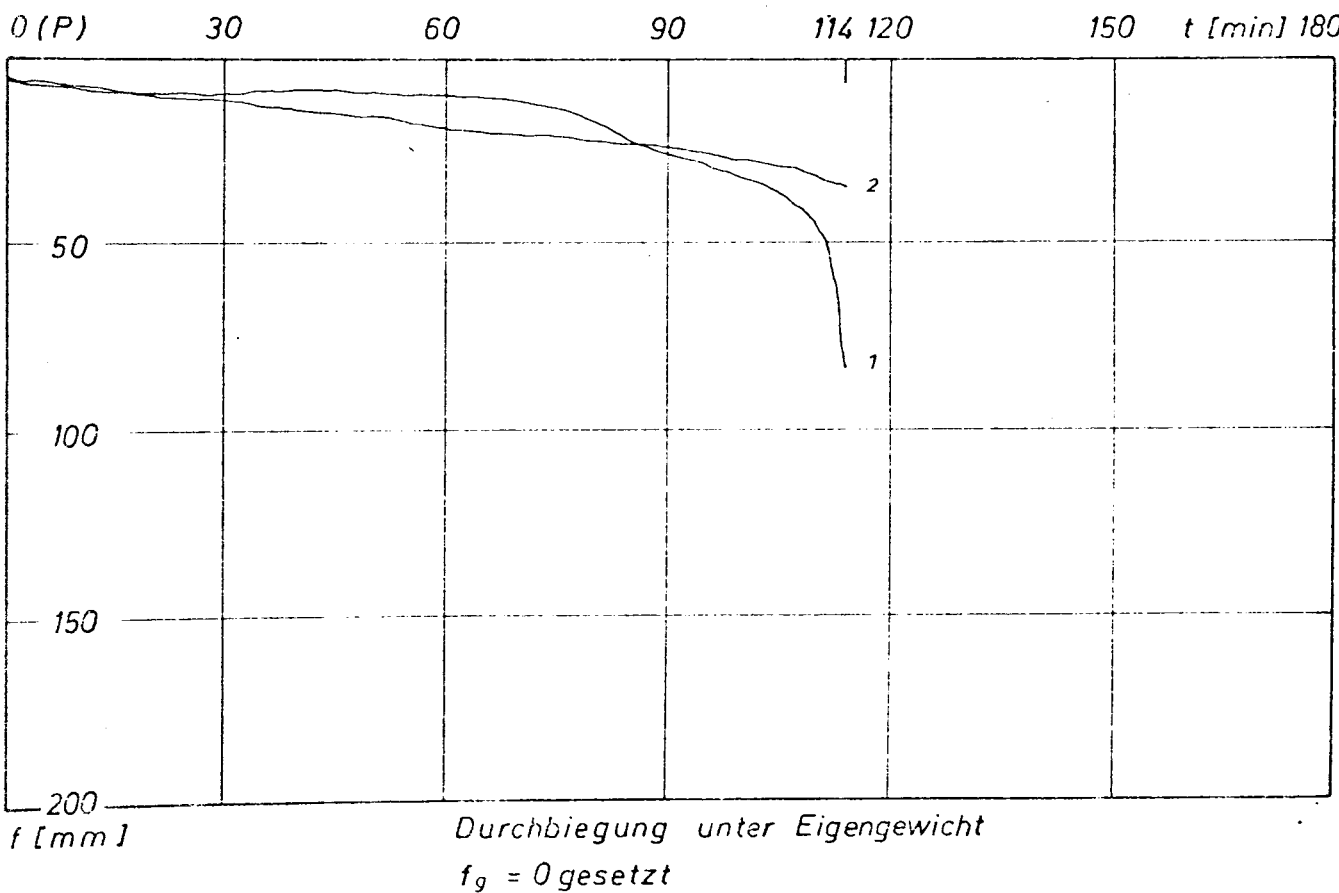
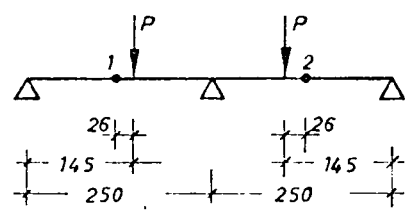
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Lage der Meßstellen



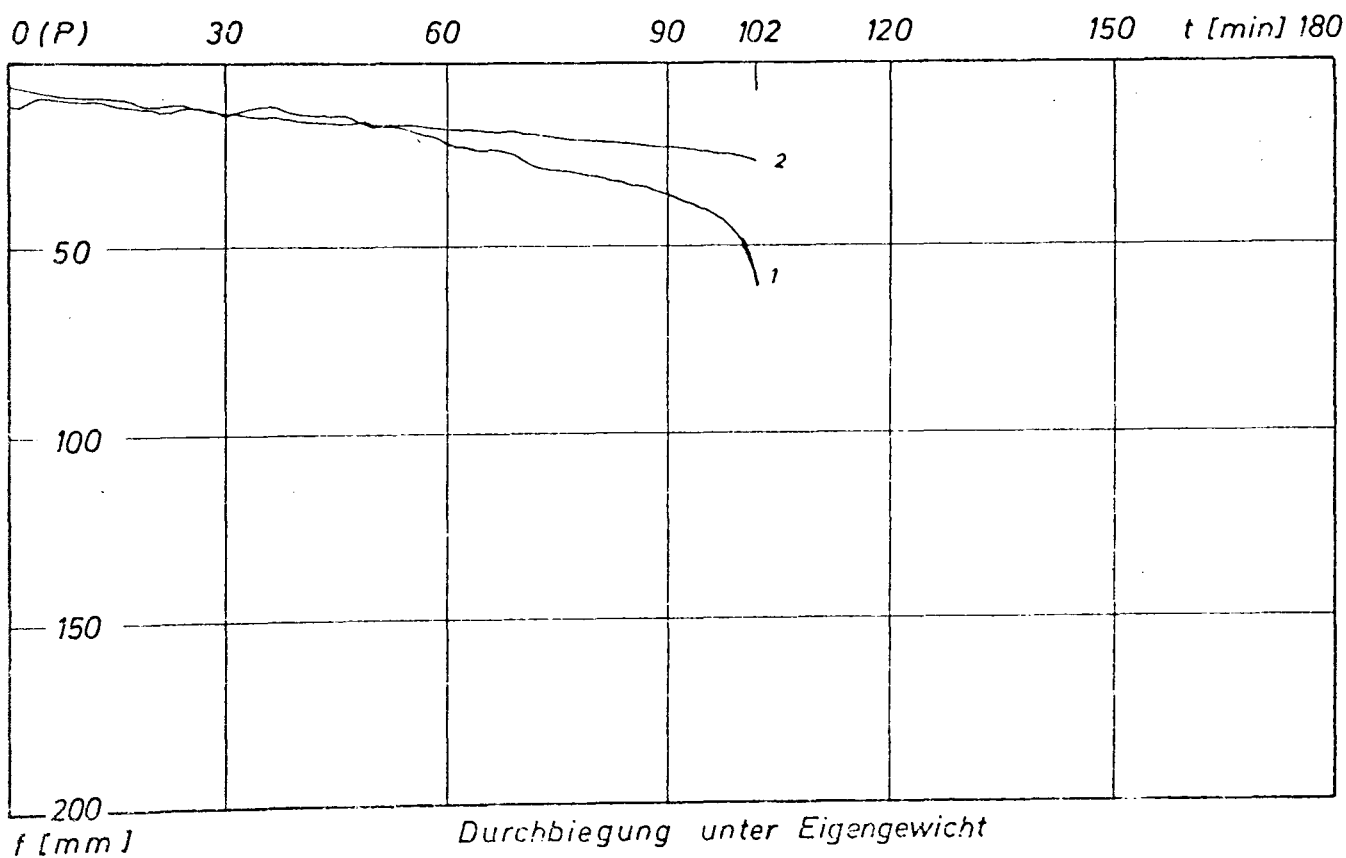
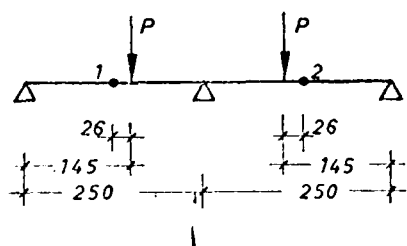
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 9
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.9
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 11
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.11
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

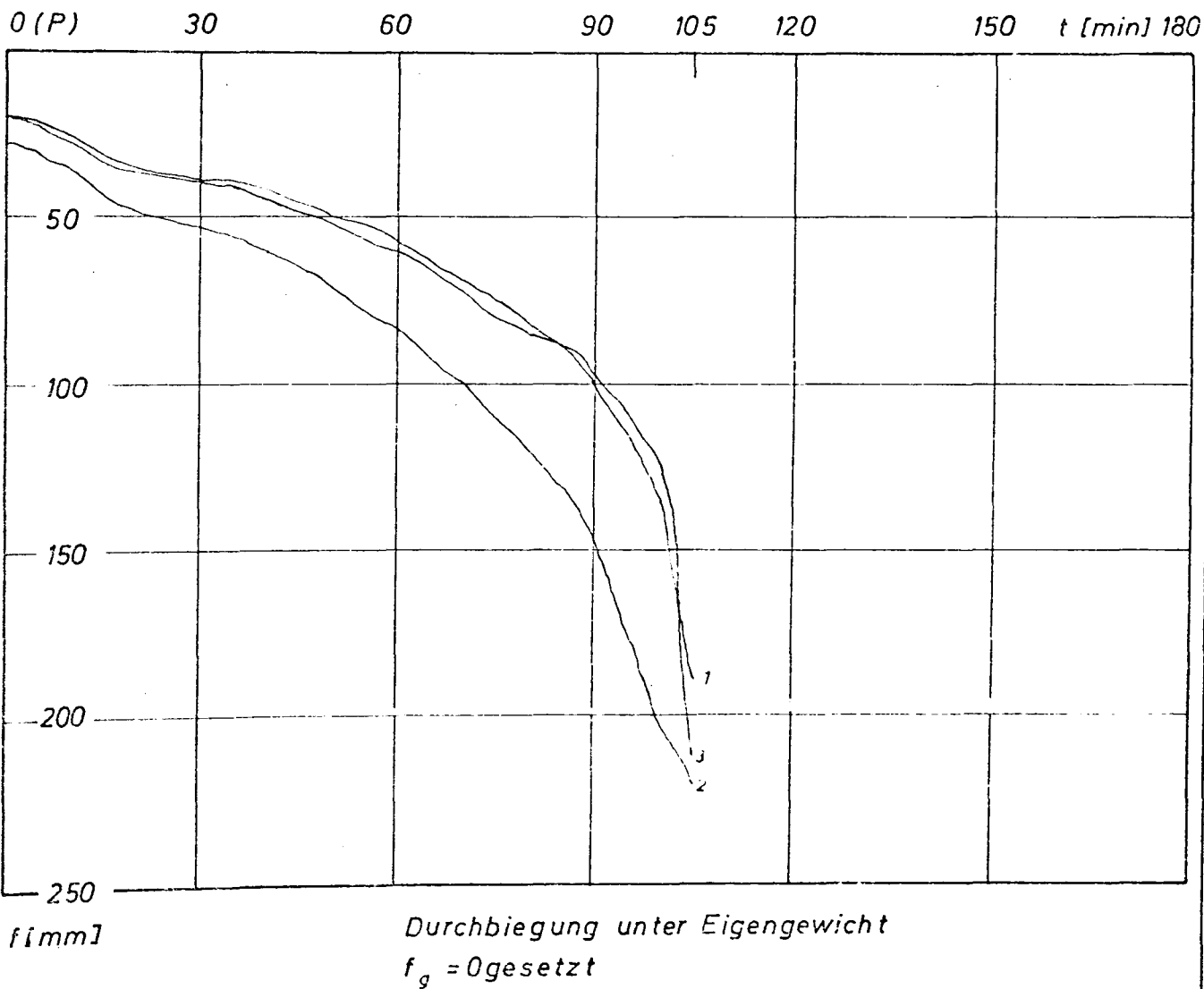
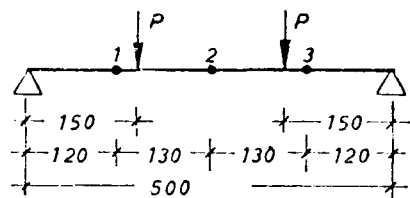
Lage der Meßstellen



Durchbiegung unter Eigengewicht  
 $f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 12
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.12
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

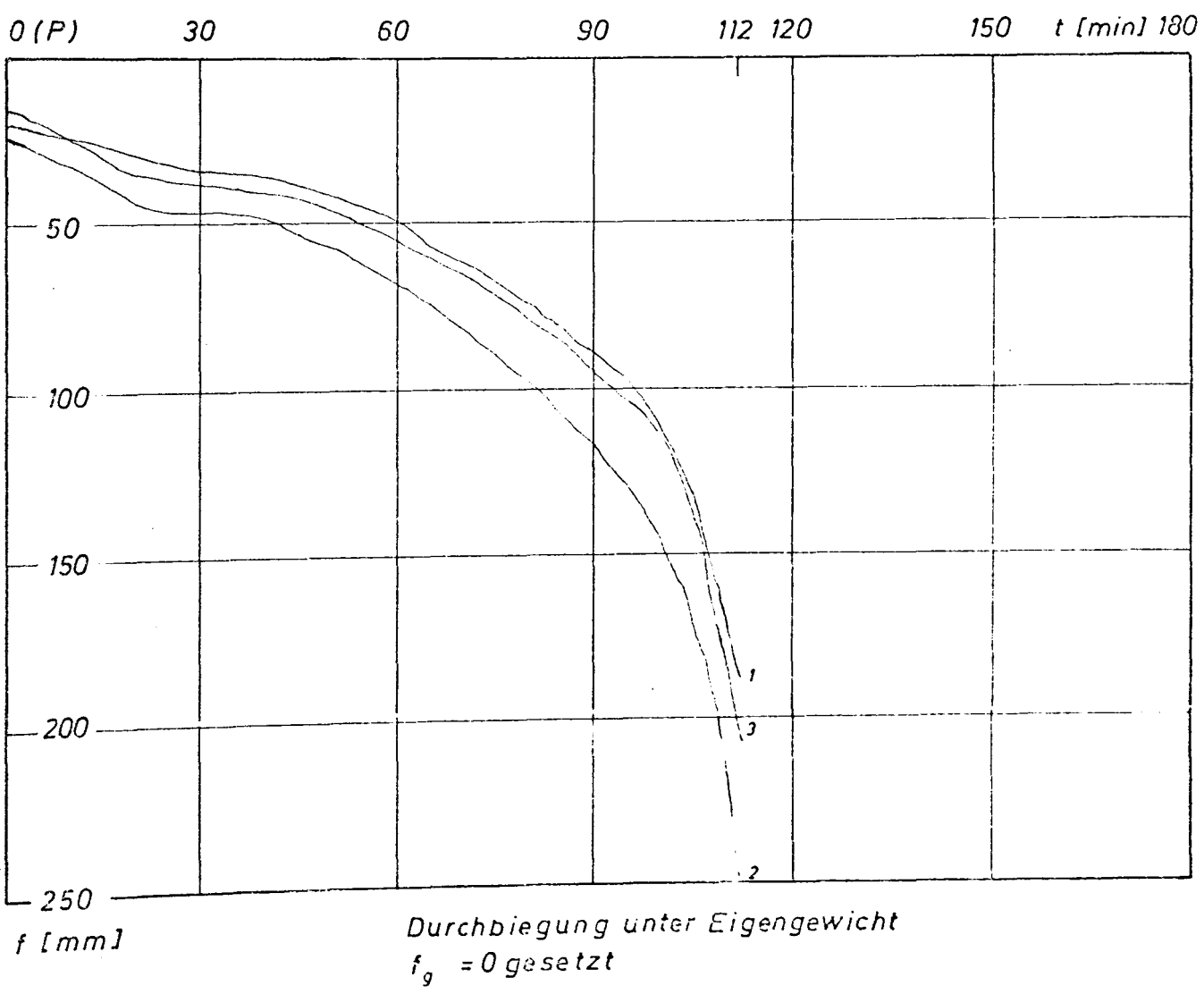
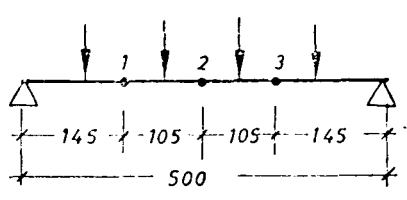
Balken 13

Durchbiegungsverlauf

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 6.13

Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

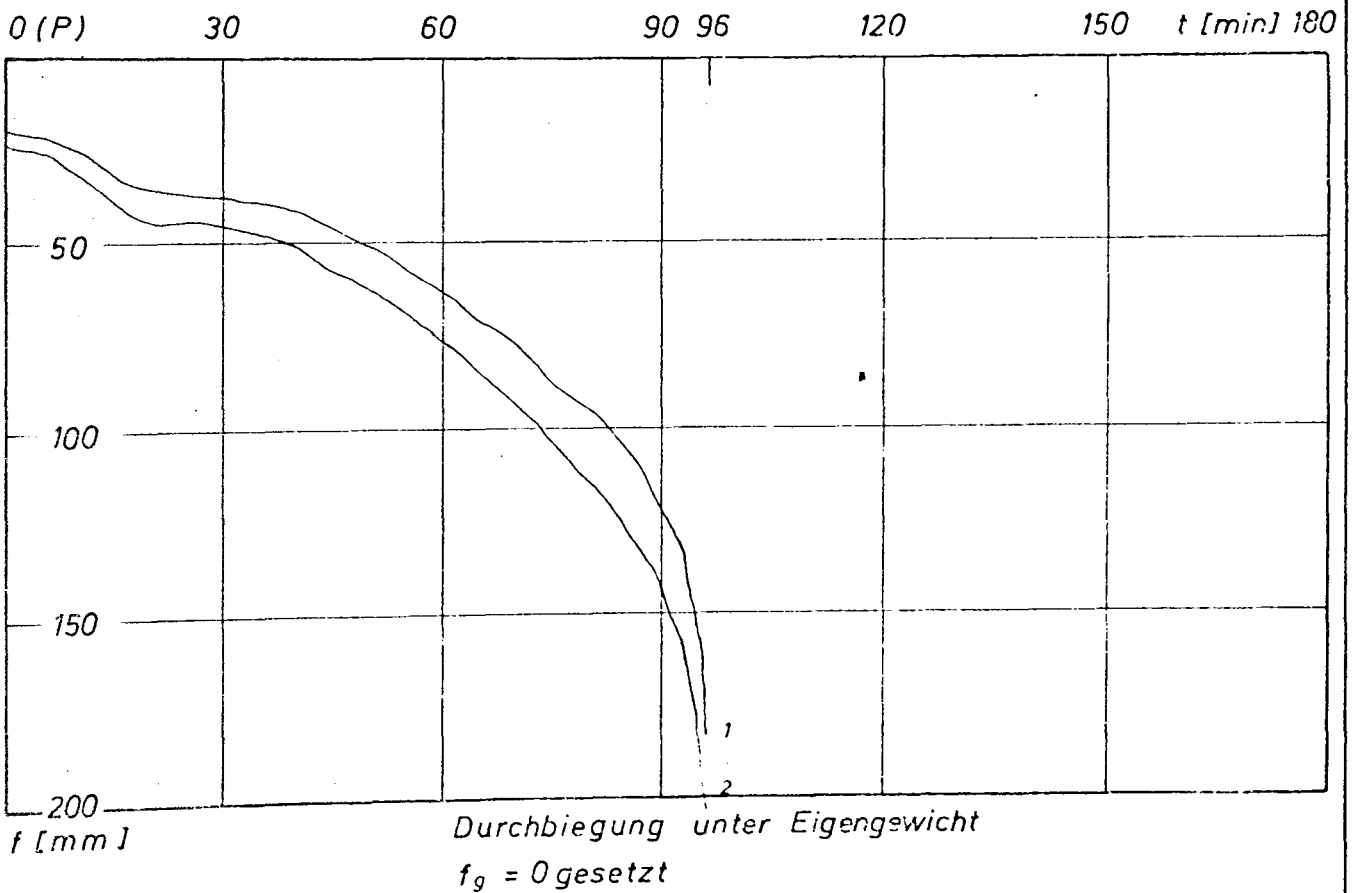
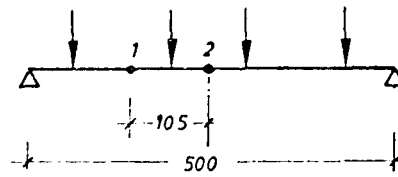
Balken 14

Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.14

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

# Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 15

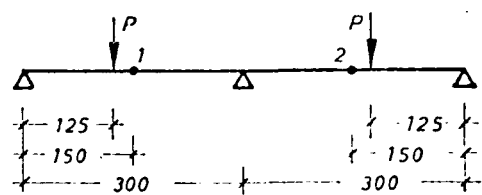
Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.15

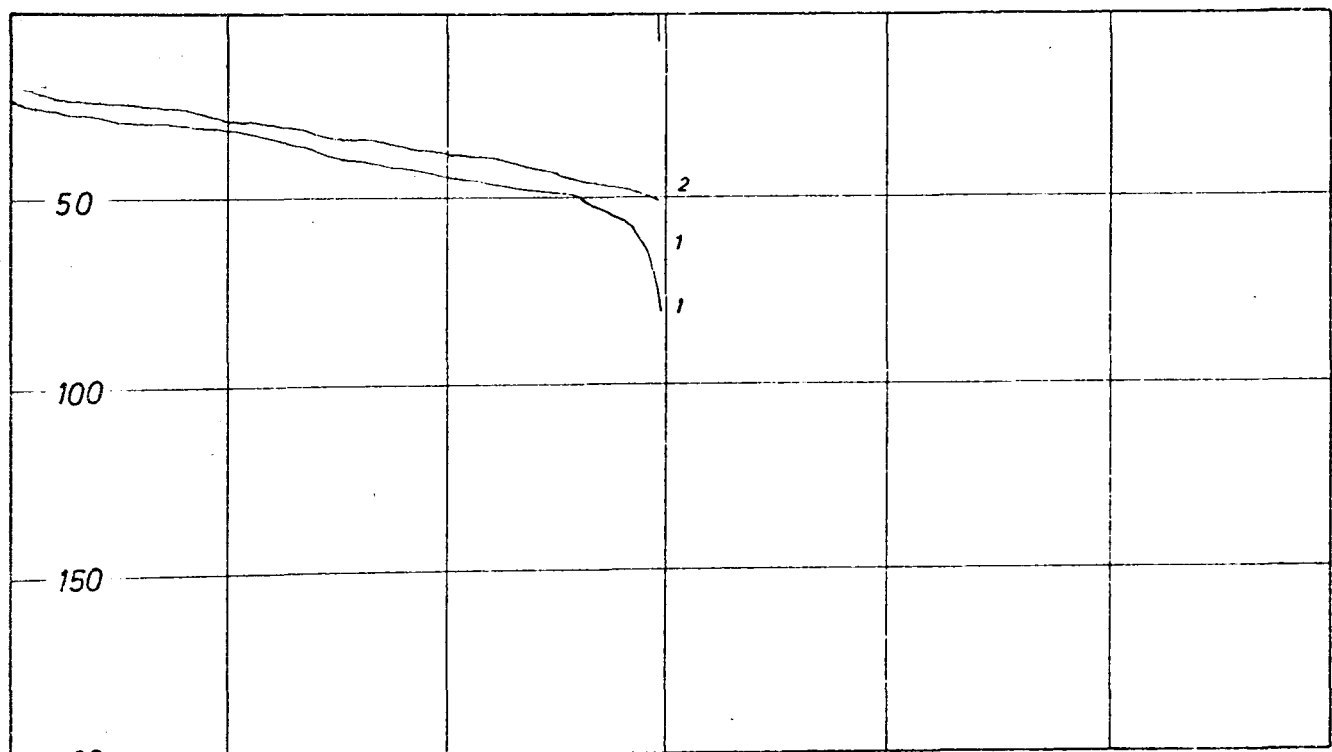
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Lage der Meßstellen



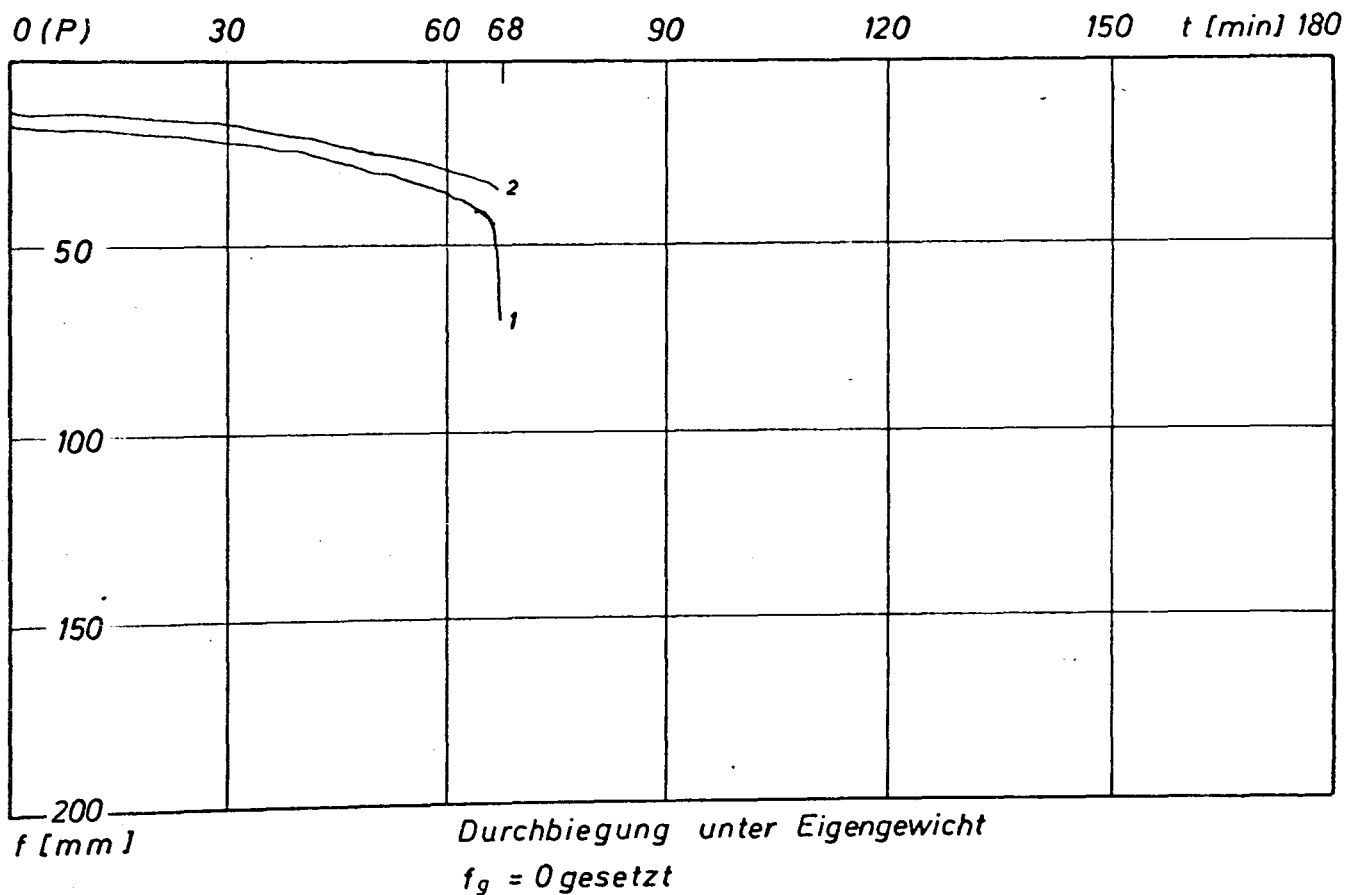
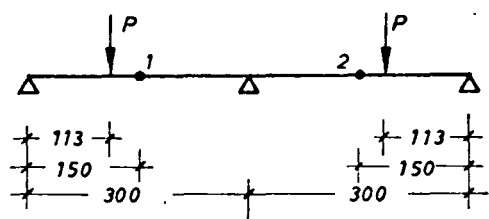
0 (P)      30      60      89 90      120      150      t [min] 180



Durchbiegung unter Eigengewicht  
 $f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 16
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.16
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

# Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

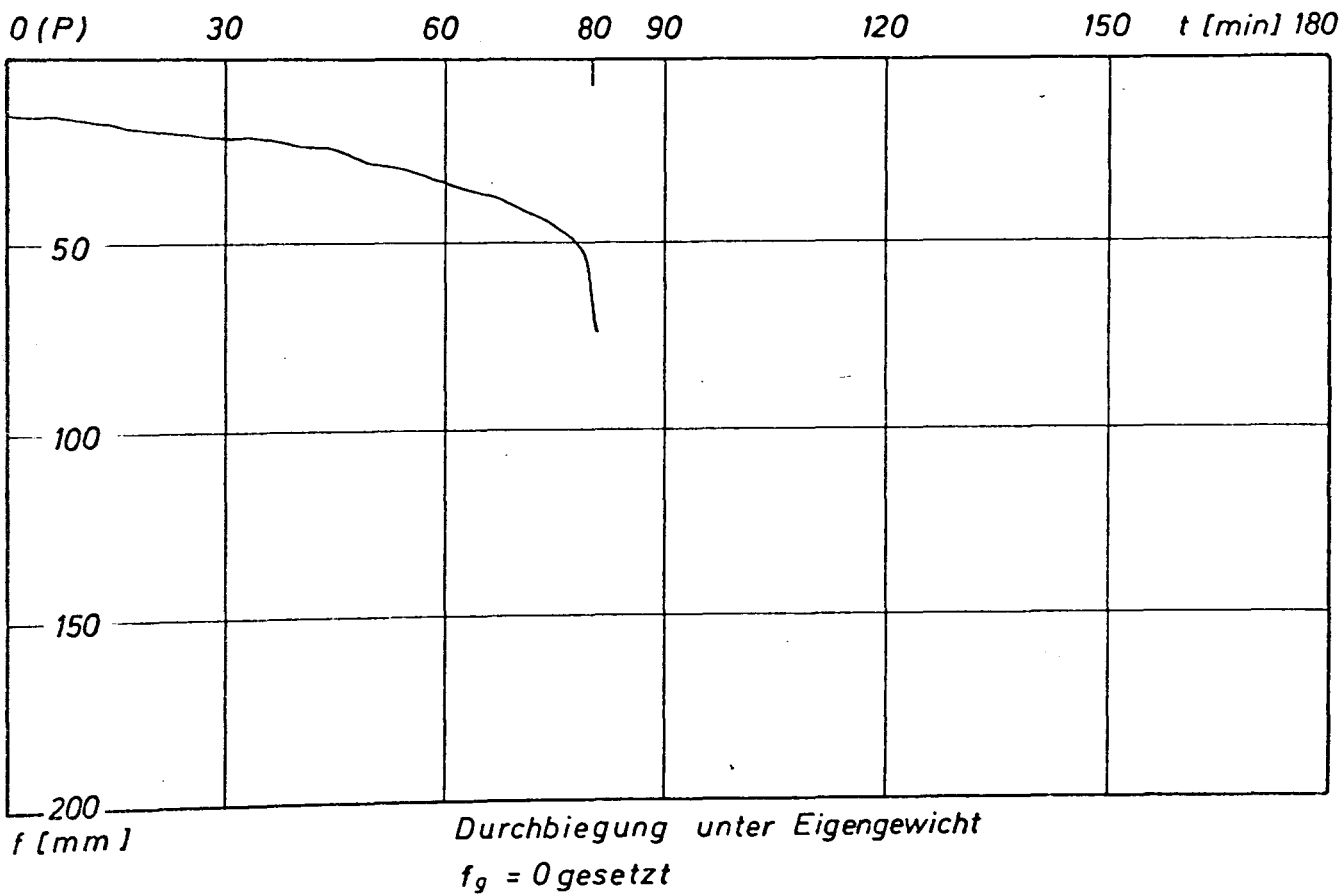
Balken 17

Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.17

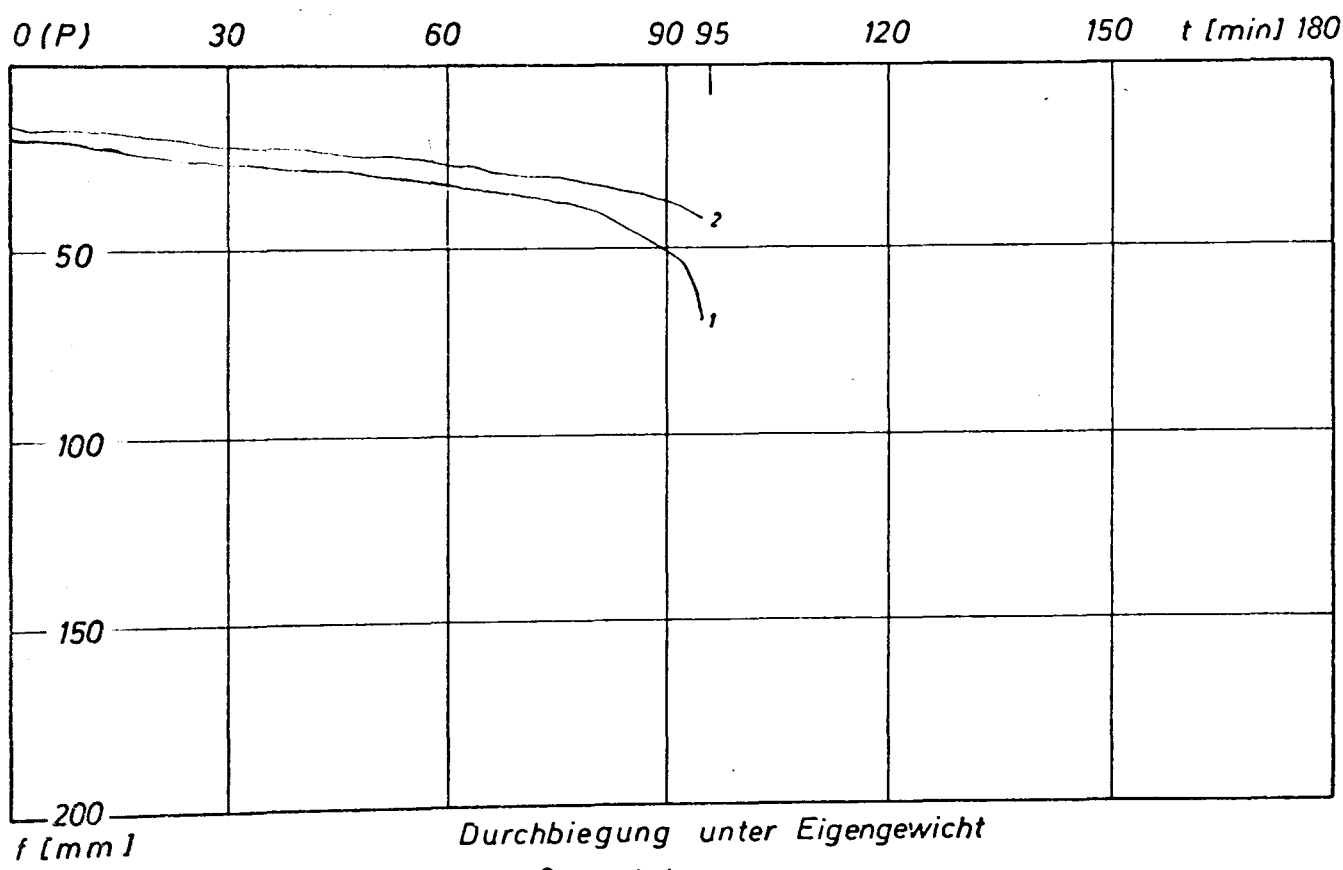
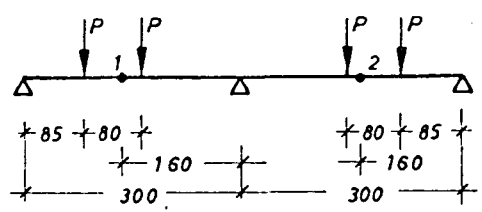
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Meßstelle in Feldmitte



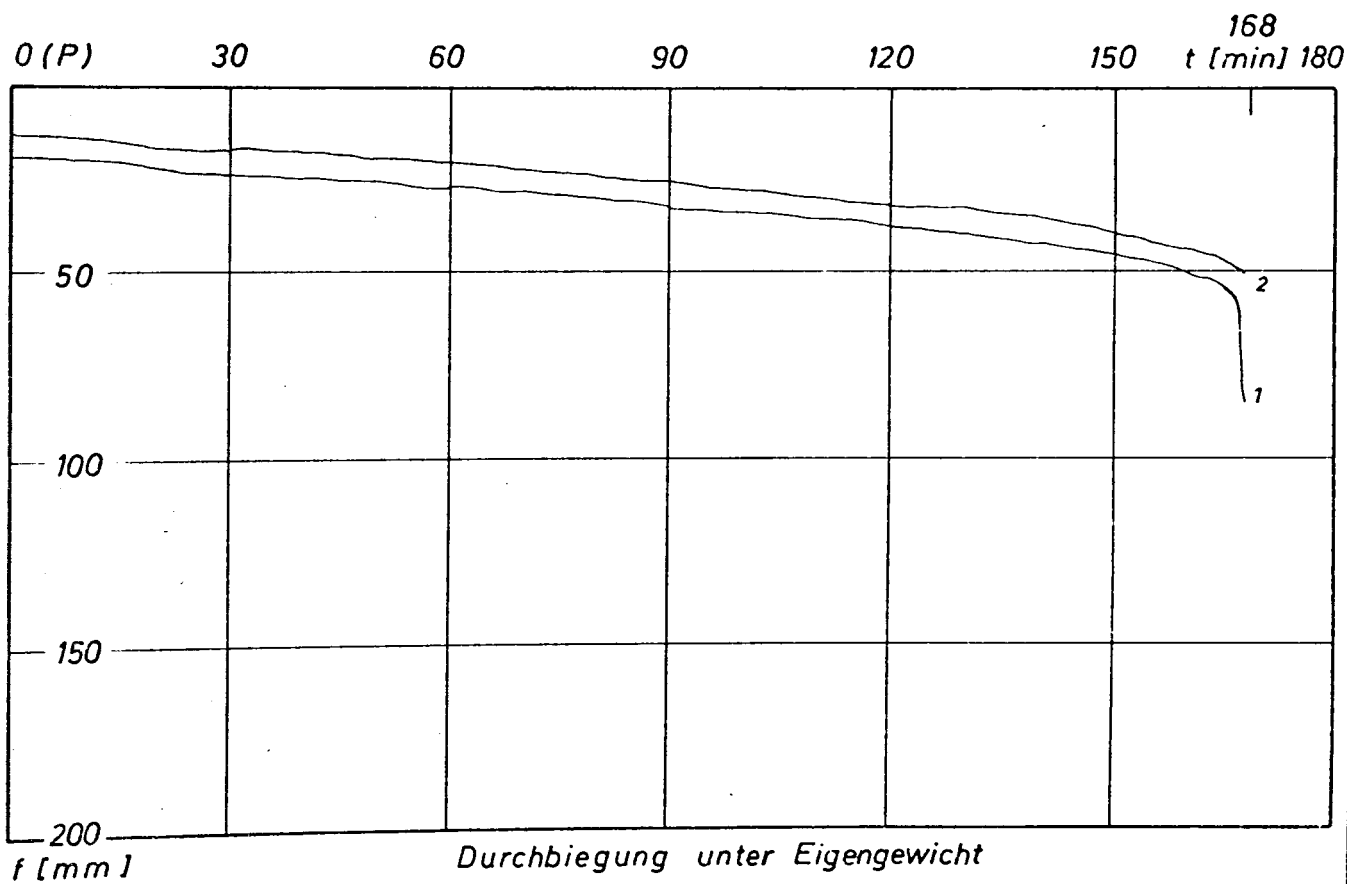
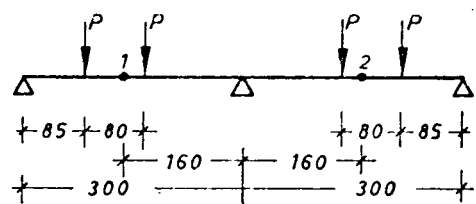
Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 18
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.18
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 19
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.19
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

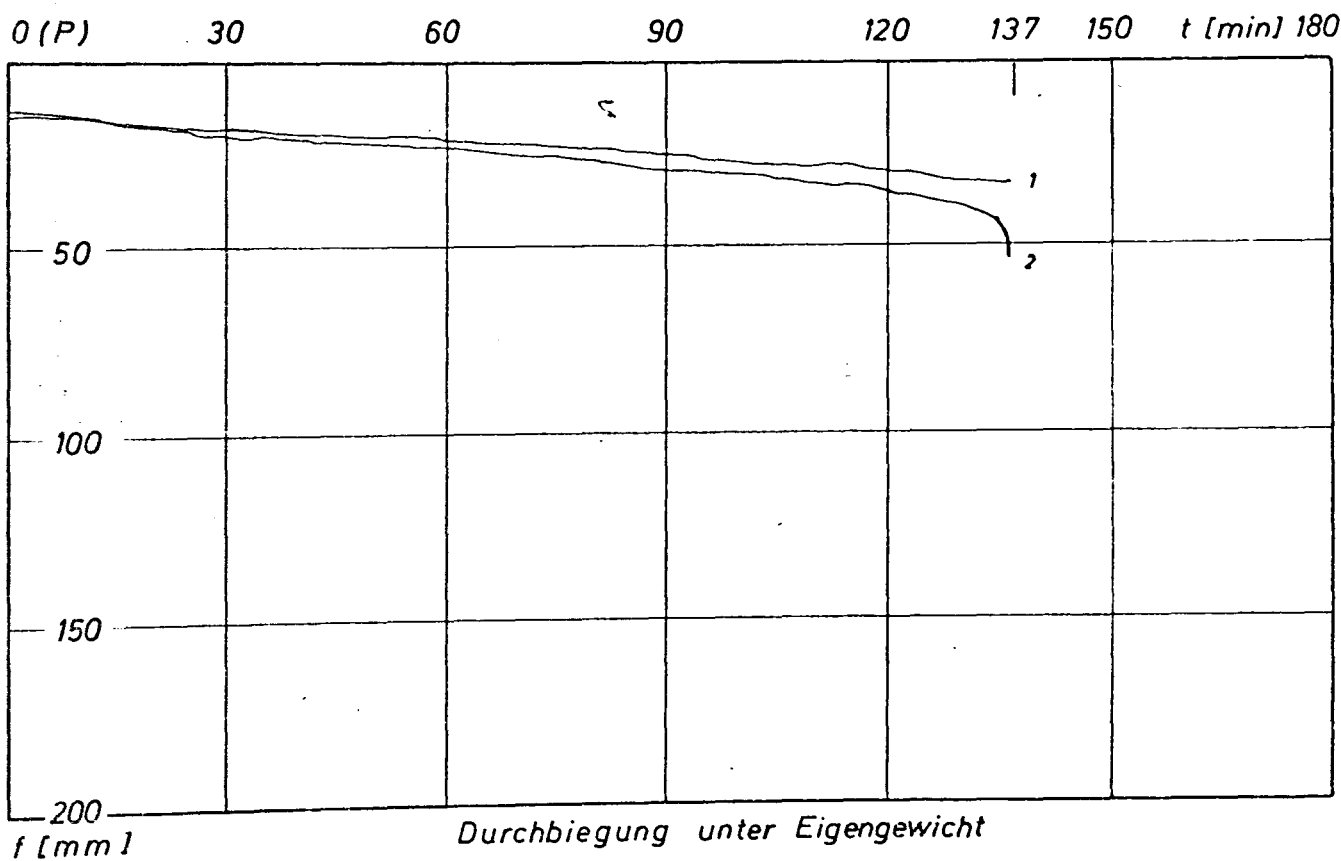
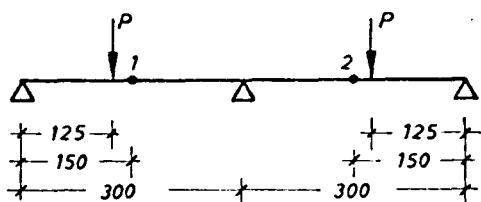
Lage der Meßstellen



Durchbiegung unter Eigengewicht  
 $f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer	Balken 20
Durchbiegungsverlauf	Anlage 6.20
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

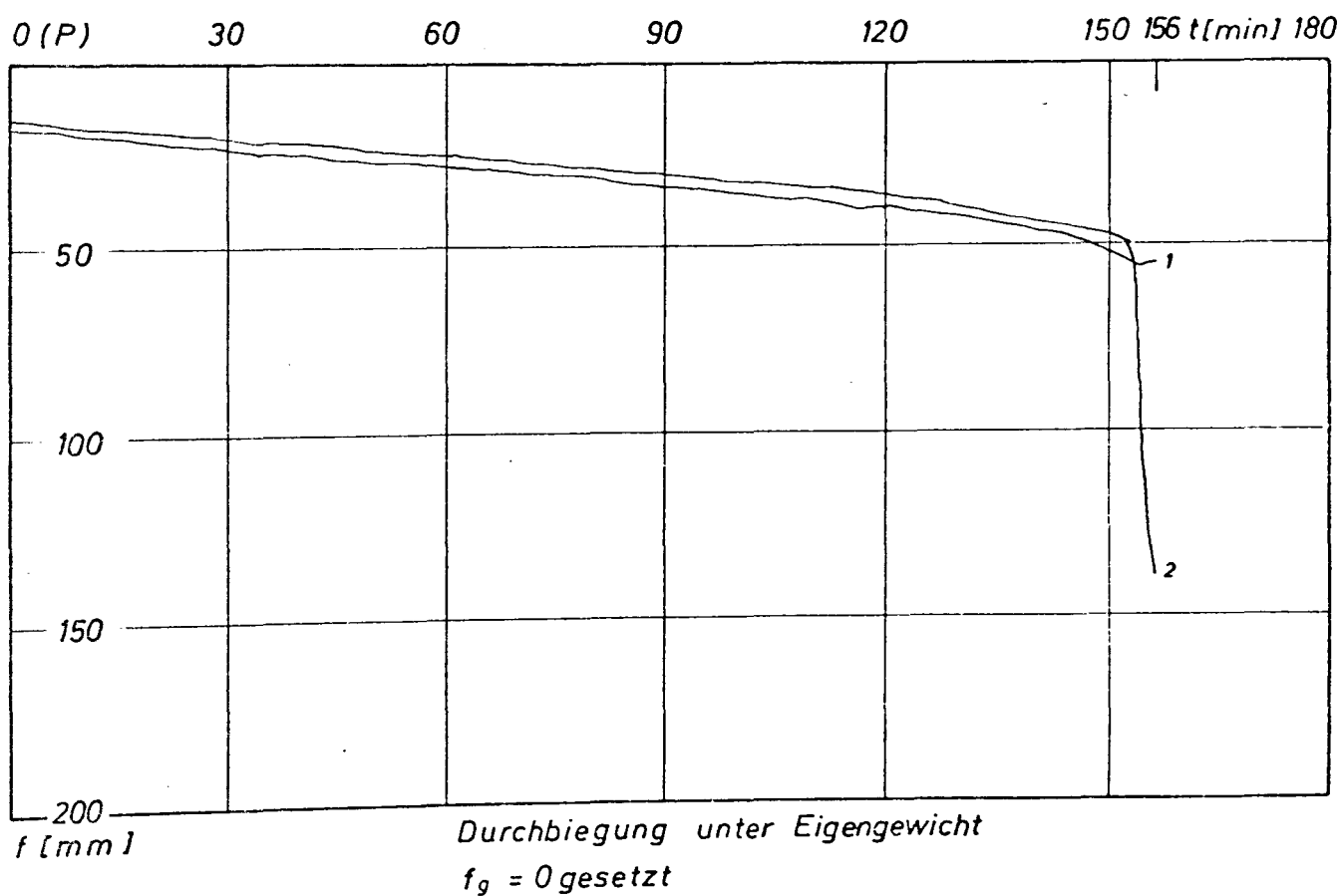
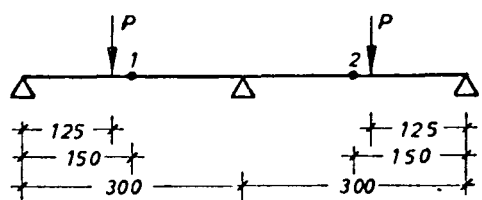
Balken 21

Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.21

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

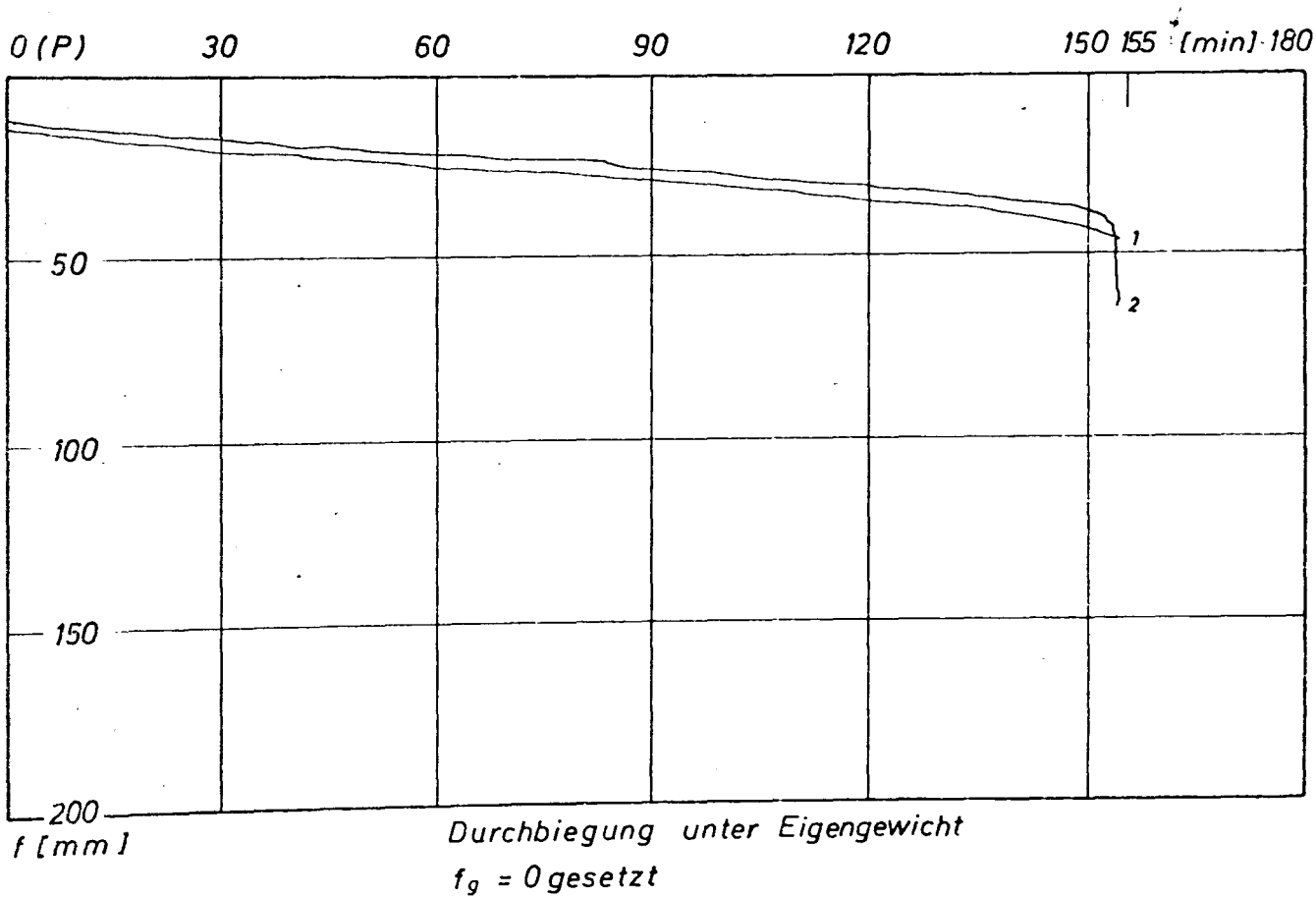
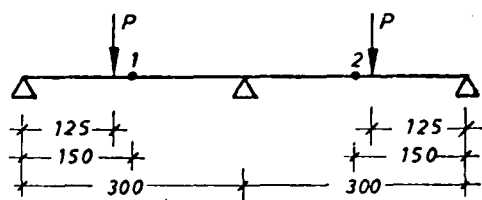
Balken 22

Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.22

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

# Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 23

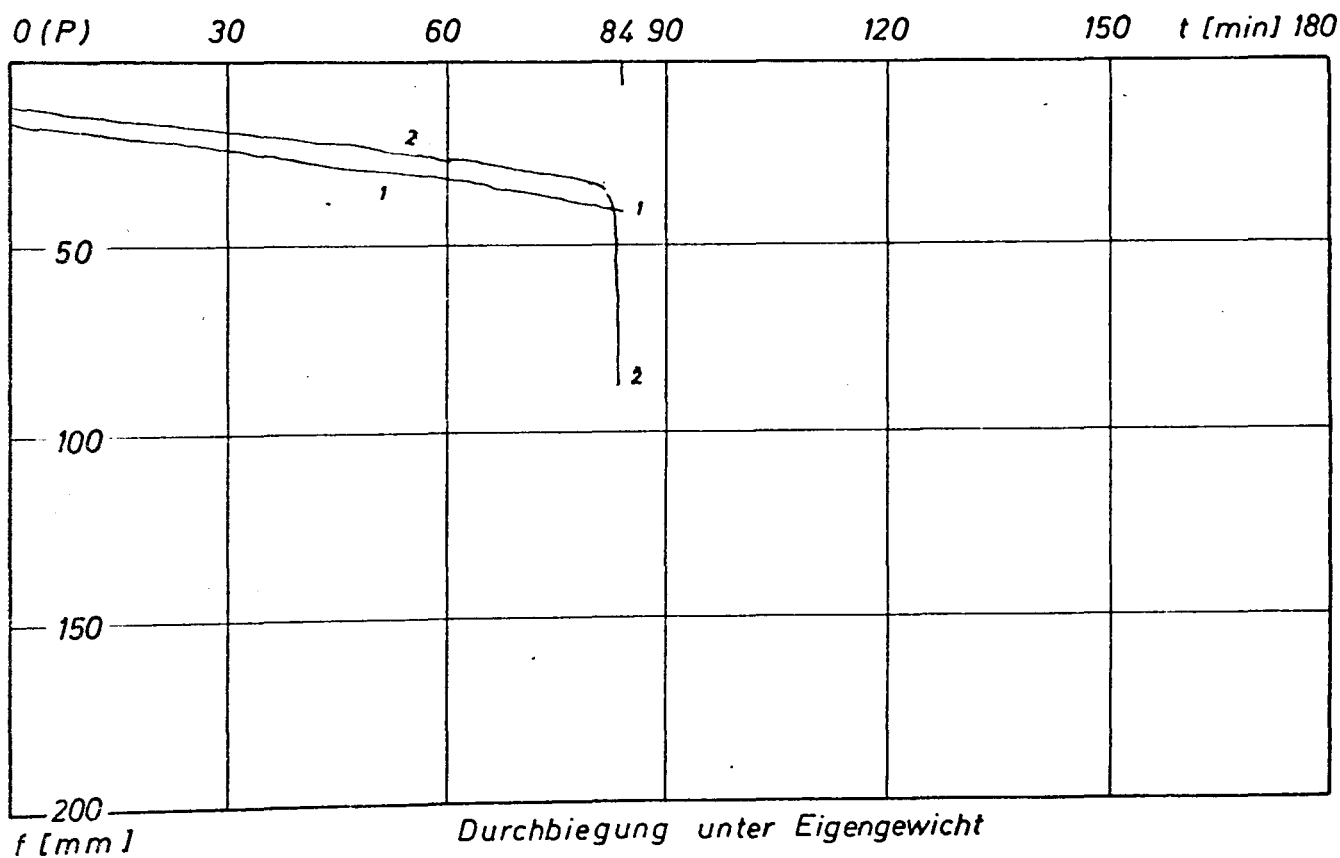
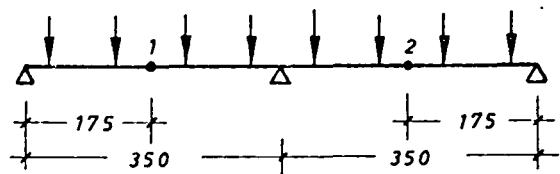
Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.23

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

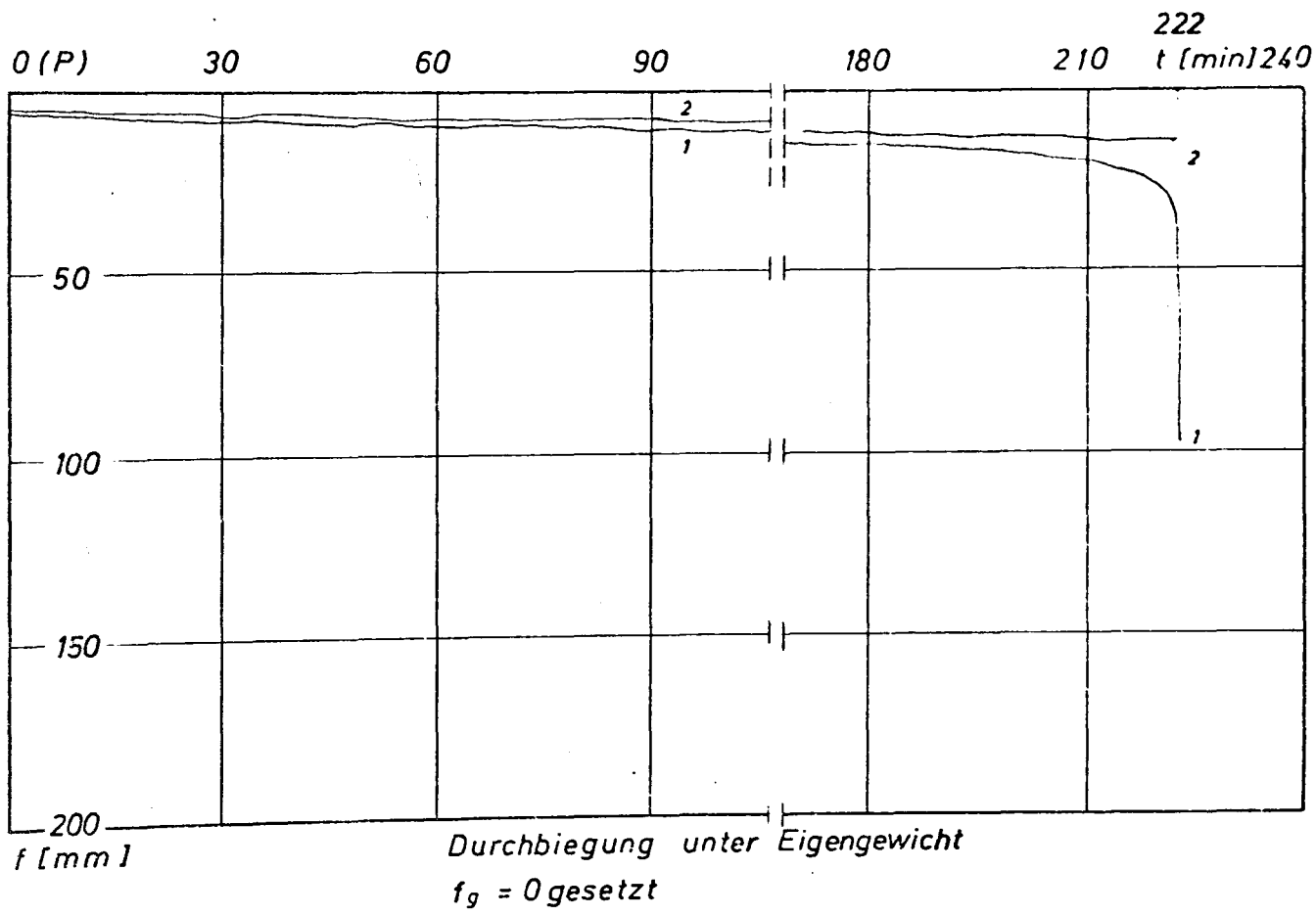
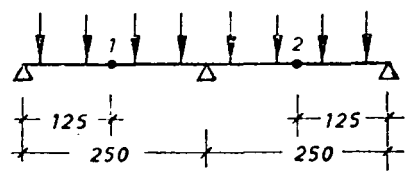
Balken 24

Durchbiegungsverlauf

Anlage 6. 24

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig  
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Lage der Meßstellen



Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 26

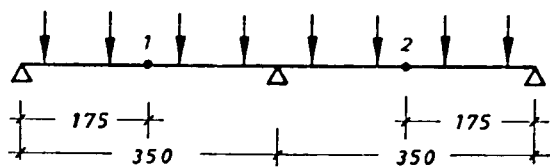
Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.26

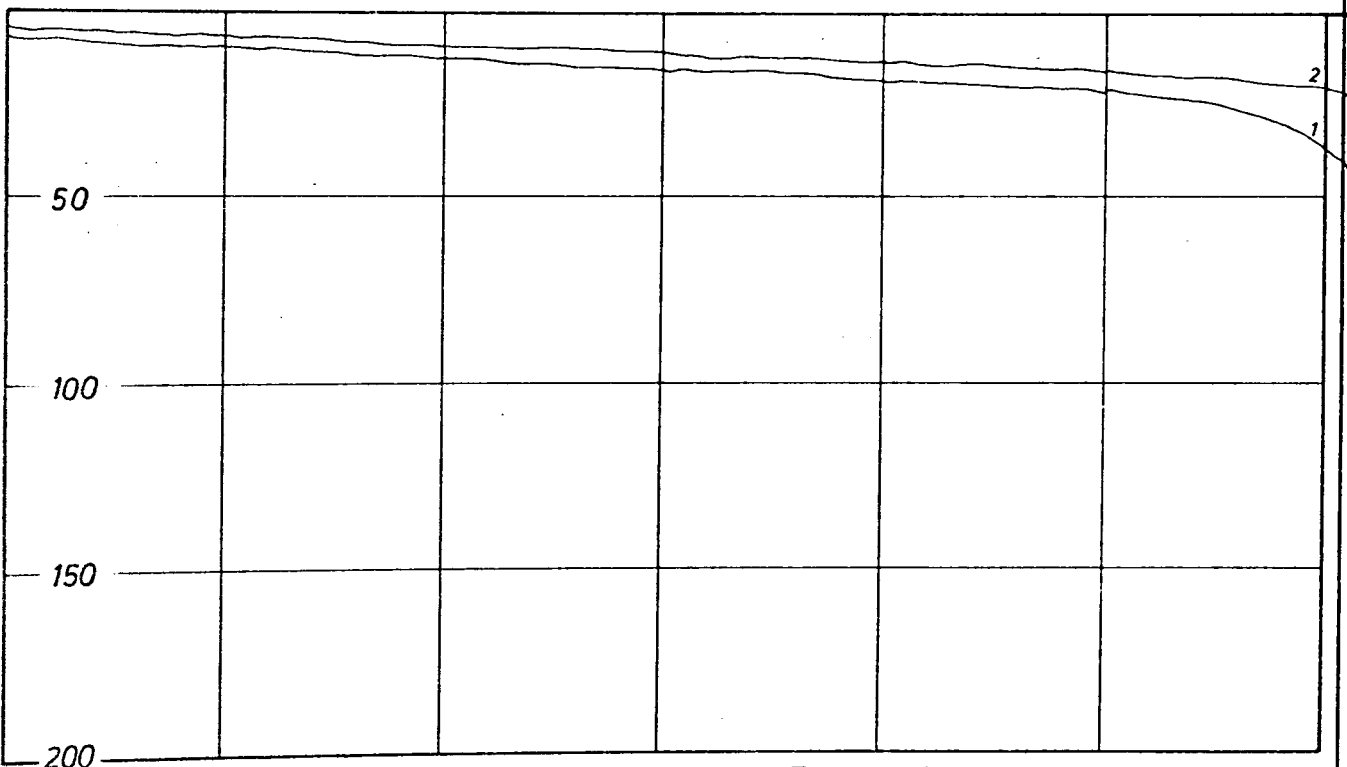
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Lage der Meßstellen



0 (P) 30 60 90 120 150 183 t [min] 180



f [mm]

Durchbiegung unter Eigengewicht

$f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 27

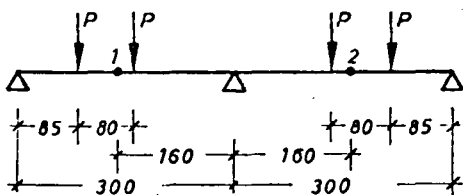
Durchbiegungsverlauf

Anlage 6.27

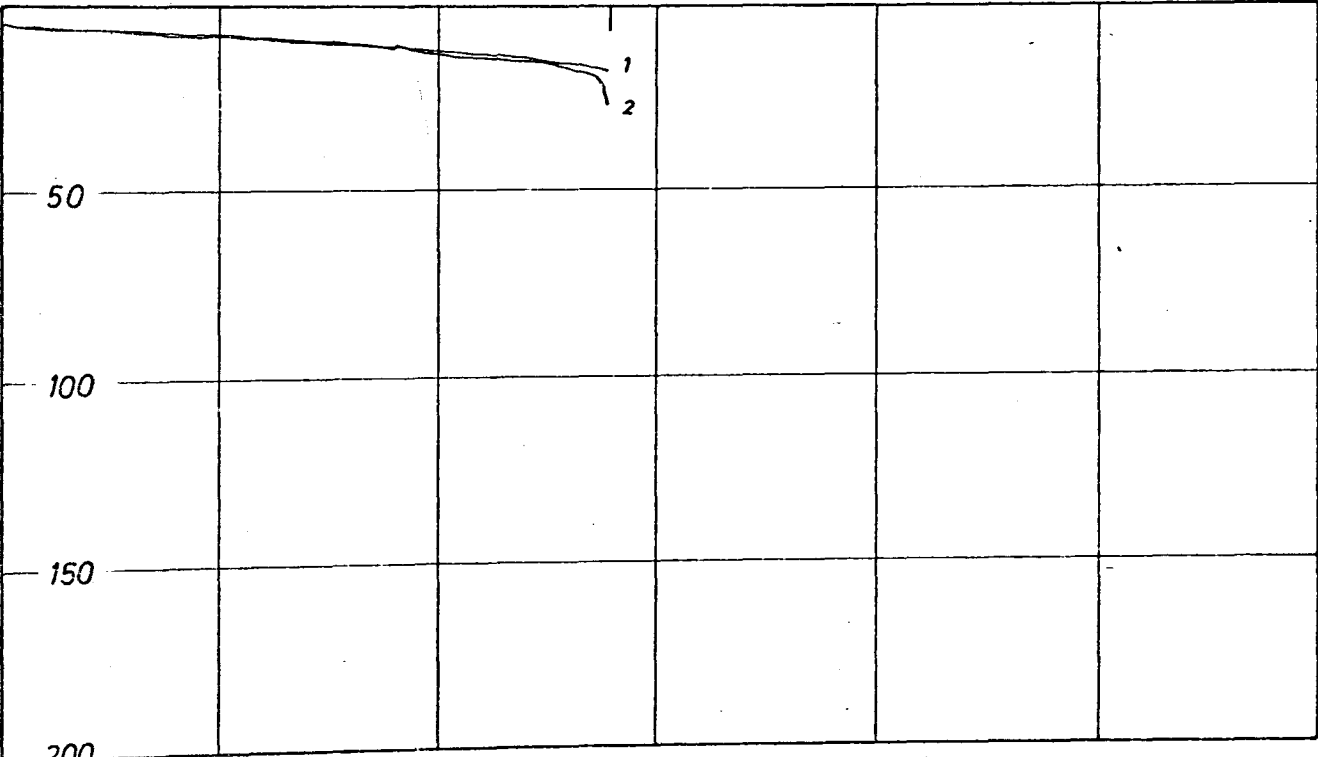
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

# Lage der Meßstellen



0 (P)                      30                      60                      84 90                      120                      150                      t [min] 180



Durchbiegung unter Eigengewicht  
 $f_g = 0$  gesetzt

Schubversagen von Stahlbetonbalken im Feuer

Balken 28

Durchbiegungsverlauf

Anlage 6. 28

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
 Technische Universität Braunschweig  
 Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen